



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRY MYLLYLÄ
SUUNNITTELU- JA SÄÄTÖPARAMETRIEN VAIKUTUS HEITTO-
JOUSIKULJETTIMEN KULJETUSKAPASITEETTIIN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Tikka-
nen

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Hydrauliikan ja automatiikan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa
7. maaliskuuta 2018

TIIVISTELMÄ

HENRY MYLLYLÄ: Suunnittelu- ja säätöparametrien vaikutus heittojousikuljetimen kuljetuskapasiteettiin
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 53 sivua, 10 liitesivua
Helmikuu 2018
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Hydraulikka ja automatiikka
Tarkastaja: professori Seppo Tikkanen

Avainsanat: heittoamplitudi, heittojousikuljetin, heittokulma, ies, ilmaväli, magneetti, säädin

Tämän diplomityön aihe syntyi toimeksiantajan tarpeesta kerrata ja varmentaa heittojousikuljettimiin liittyneitä oletuksia. Toimeksiantajana tässä työssä toimi TT-Tärylaite Oy, joka on valmistanut heittojousikuljettimia aiemminkin, mutta viimeisestä vastaavasta kuljetinprojektista on aikaa useampi vuosi. Yrityksen henkilöstö koki tarvitsevänsä lisää käytännön tietoa kuljettimen suunnitteluun ja rakennuttamiseen. Lisäksi haluttiin saada vastaus ilmavälin kasvattamiseen liittyvään ongelmaan, jotta toimeksiantaja pystyisi rakentamaan magneettikäyttöisen kuljettimen aiempaa pidemmällä heittoliikkeellä.

Diplomityön tulosten perusteella heittojousikuljettimen ilmaväliä voidaan kasvattaa yli laitevalmistajan ilmoittaman luokitellun ilmavälin, mikä mahdollistaa pidemmällä heittoamplitudilla varustetun kuljettimen rakentamisen. Myös nousukulman käyttö on mahdollista kuljetettavasta aineksesta riippuen.

Kuljettimen ja kuljetettavan aineksen välinen kitkakerroin on merkittävin kulkeutumiseen vaikuttava yksittäinen parametri, mutta se ei yksin kerro todellista kulkeutumisnopeutta. Muita kulkeutumisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kappaleen muoto ja aineksen kokonaismäärä, voiman ja heittoamplitudin kasvattaminen sekä kuljetustaajuus. Mikään edellä mainituista parametreista ei yksinään takaa hyvää kulkeutumisnopeutta, vaan onnistunut kuljetinratkaisu vaatii tapauskohtaisen virittämisen. Useimmissa tilanteissa voiman ja heittoamplitudin kasvattaminen nopeuttaa aineksen kulkeutumista. Järkevällä resonanssitaajuuden hyödyntämisellä voidaan saavuttaa sama voima ja heittoamplitudi pienellä energiamäärällä.

Diplomityön tavoitteet saavutettiin, eli toimeksiantaja koki saaneensa vastauksia heittokuljettimiin liittyneisiin epäselviin kysymyksiin ja vahvistamattomiin oletuksiin. Diplomityönä teetetty kuljetin on myyty jo asiakkaalle ja vastaavan laisille kuljettimille vaikuttaisi olevan enemmänkin kysyntää. Kuljettimen rakennuttamiseen liittyen jäi muutamia kysymyksiä ilman selitystä, mutta ongelmakohtiin osataan nyt varautua.

ABSTRACT

TOIMI KUNTA: The effects of design and tune parameters on a linear conveyor's conveying capacity

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 53 pages, 10 Appendix pages

February 2018

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Hydraulics and Automation

Examiner: Professor Seppo Tikkanen

Keywords: throwing amplitude, linear conveyor, throwing angle, anchor, air-gap, magnet, controller

The subject for this Master's thesis derived from a need to revise and ensure assumptions related to the linear conveyors. This kind of linear conveyors have been built by the company in the past but it has been a relatively long time ago. The current staff of the company didn't have the know-how for designing and building of a linear conveyor. There were some issues like the problem of increasing the air-gap that had to be researched. Simultaneously many other uncertainties and open questions got an answer.

It showed up that the air-gap can be increased carelessly past the magnet manufacturer's rated air gap. This means that linear conveyors with a bigger throwing amplitude can be built if necessary. Also, it was discovered that climbing angle is possible to achieve if the conveyed material is well conveyable.

The friction coefficient between the linear conveyor's surface and the conveyed material is the biggest single parameter that explains the conveying speed of the material. However, it doesn't guarantee a good conveying speed alone. There are other factors like the shape and the amount of the material that may decide whether the conveying speed is good or bad.

Increasing of the force or the throwing amplitude will make the material flow faster in most of the cases. However, a use of the resonance frequency may give better solution with less required power and less damaging forces towards the conveyor and the conveyed material.

There are still some open questions related to the construction of the linear conveyor but now they can be paid extra attention so that similar problems wouldn't arise again. A similar linear conveyor has already been sold to a customer. The lessons and solutions found during this project won't go in vain but rather they are a great asset in the future.

ALKUSANAT

Haluan kiittää erityisesti professori Seppo Tikkasta ja DI Tapio Saranpäästä tämän työn mahdollistamisesta. Koen saaneeni tehdä tutkimustyötä hyvin vapain käsin ja olen myös tyytyväinen saavutettuihin tuloksiin ja vastauksiin. Työnantaja on mahdollistanut yliopistossa opittujen tietojen ja taitojen syventämisen erittäin laaja-alaisesti. Olen päässyt hyödyntämään hydrauliiikan opintojani kuljettimien ainevirtojen suunnittelussa ja pneumaattisten täryjen hahmottamista on helpottanut aikaisempi kokemus hydraulisten toimilaitteiden rakenteesta. Automaatiotekniikan opinnot ovat mahdollistaneet kuljettimien säätöparametrien ymmärtämisen. Sähkötekniikan kurssien opit ovat mahdollistaneet magneettisten toimilaitteiden ymmärtämisen sekä teoriassa että käytännössä. Tuotantotaloudesta on ollut apua kustannusten, toimitusaikojen ja varastonhallinnan ymmärtämisessä. Monipuolisen opetuksen hyödyllisyys ja tarpeellisuus on selkeytynyt vasta työelämässä. Työnteko on jatkuvaa uuden oppimista ja opittujen tietojen syventämistä, johon opiskelu antaa hyvät pohjatiedot. Miellän DI-tutkinnon todistukseksi siitä, että valmistuvalla opiskelijalla on valmiudet omaksua haastaviakin uusia asioita itsenäisesti. Toivon kaikille teekkareille intoa ja motivaatiota kurssien suorittamiseen ja läpi elämän kestävään opiskeluun.

Espoossa 15.2.2018

Henry Myllylä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TEORIA	5
2.1	Kourun ja putken ominaisuudet	7
2.2	Magneetin ominaisuudet	8
2.3	Jousen ominaisuudet	14
2.4	Heittokulman ja heittoluvun vaikutukset	16
3.	HEITTOJOUSIKULJETTIMEN SUUNNITTELU	20
3.1	Kourun kestävyysvarmistaminen	20
3.2	Osien suunnittelu	22
3.3	Rakenteiden ja kokoonpanon suunnittelu	24
4.	HEITTOJOUSIKULJETTIMEN RAKENNUTTAMINEN JA ASENTAMINEN	25
5.	HEITTOJOUSIKULJETTIMEN OHJAUS	31
5.1	Taajuussäädin	33
5.2	Mittaustulokset	35
5.3	Jousien säätäminen	38
5.4	Ilmavälin säätäminen	38
5.5	Nousukulman säätäminen	40
6.	YHTEENVETO	42
7.	LIITTEET	44
	LÄHTEET	54

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Heittojousikuljettimen tehonlähteinä voidaan käyttää useita eri toimilaitteita [2]	2
Kuva 2.	Heittojousikuljetin elintarviketehtaalla [8]	3
Kuva 3.	Monipäävaakaan syötetään ruoka-aineeksi neljällä heittojousikuljettimella [7]	4
Kuva 4.	Tyypillinen rakennekuva magneettikäyttöisestä heittojousikuljettimesta. [5]	5
Kuva 5.	Yksinkertainen ilmapäälilinen magneettipiiri [3]	8
Kuva 6.	Rakennekuva magneetin ja ankkurin, eli ieksen välisestä kytkennästä [3]	9
Kuva 7.	Havainnekuva tässä työssä käytössä olleesta magneettitoimilaitteesta [1]	10
Kuva 8.	Havainnekuva magneetin ja sen ieksen läpi kulkevasta magneettivuosta [1]	10
Kuva 9.	Magneettinen voima ilmapäälin funktiona [1]	11
Kuva 10.	Alkeismagneettien kääntäminen ulkoisen magneettikentän mukaiseen suuntaan [3]	12
Kuva 11.	Magneetin rautasydämen magnetoitumisessa syntyvä hystereesikäyrä [3]	12
Kuva 12.	Heittoluvun suhde kuljetusnopeuteen [5]	16
Kuva 13.	Heittoliikkeessä vaikuttavia voimia ja kulmia [5]	17
Kuva 14.	Heittoliikkeen vaiheet [5]	18
Kuva 15.	Kitkakertoimen ja heittokulman välinen yhteys [5]	19
Kuva 16.	Solidworksin verkottama kouru	20
Kuva 17.	Solidworksin fem-analyysiä hyödyntävä jännitekaavio	21
Kuva 18.	Solidworksin esitys kourun varmuuskertoimista	22
Kuva 19.	Magneettipedin pohjan osakuva	23
Kuva 20.	Rakennekuva heittojousikuljettimesta Solidworksin ruudunkaappauksena	24
Kuva 21.	Magneetin ja ieksen kiinnitykset pystysuorassa	26
Kuva 22.	Jousenkannatin on kiinni kuljettimen rungossa	27
Kuva 23.	Magneetin ja ieksen virheellinen asemointi	28
Kuva 24.	Laserleikkuuseen mennyt DXF-kuva kourusta	29
Kuva 25.	Päättyseinämään projisoituneet reiät	30
Kuva 26.	Heittojousikuljettimen mittaussjärjestelyt	31
Kuva 27.	Resonanssivärähtelijän ali- ja ylikriittiset toiminta-alueet [9]	33
Kuva 28.	Taajuussäätimen takaisinkytkentä [9]	34
Kuva 29.	Heittojousikuljettimen heittopituus värähtelytaajuuden funktiona	35
Kuva 30.	Heittojousikuljettimen kiihtyvyys värähtelytaajuuden funktiona	36

<i>Kuva 31.</i>	<i>Heittojousikuljettimen laskennallinen kuljetusnopeus värähtelytaajuuden funktiona</i>	<i>37</i>
<i>Kuva 32.</i>	<i>Nousukulma on merkittävä kuljetusnopeuteen vaikuttava parametri</i>	<i>40</i>

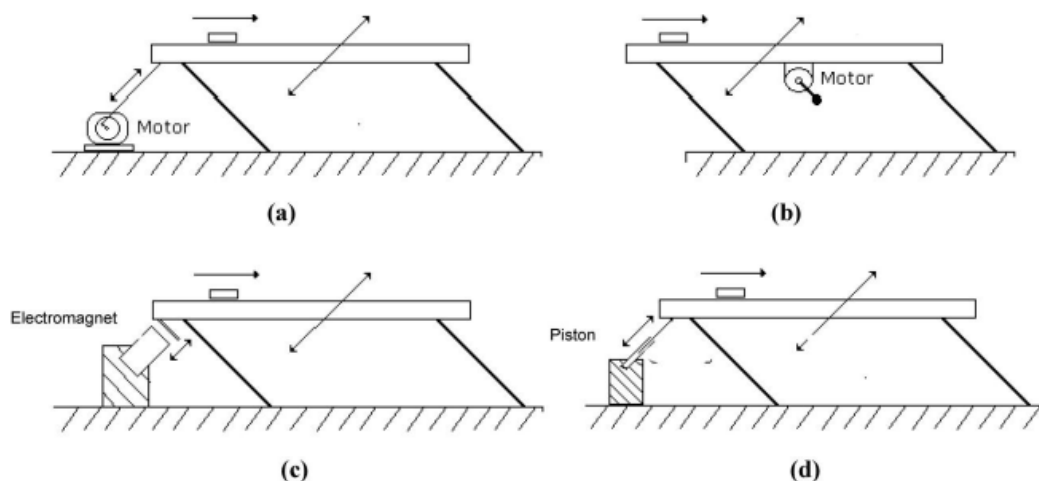
LYHENTEET JA MERKINNÄT

DXF	Drawing interface format. Tässä työssä dxf:llä tarkoitetaan 2D-muodossa olevaa osa- tai rakennepiirustusta.
päävu	Päävuolla tarkoitetaan magneetin rautasydämen ja ieksen läpi kulkevaa magneettivuota.
hajavuo	Hajavuolla tarkoitetaan magneettivuossa hukkaan menevää osuutta. Toivottu magneettinen päävu kulkee magneetin ja ieksen läpi.
iskukäyttö	Magneetti ja sen ies hakkaavat toisiaan vasten
ies	Magneetin vastakappale, jonka läpi magneettivuon halutaan kulkevan.

1. JOHDANTO

Teollisuudessa esiintyy monenlaisia materiaalivirtoja ja niiden hallitsemiseksi tarvitaan monenlaisia kuljettimia ja annostelijoita. Jatkovatoimisissa prosessiteollisuuden sovelluksissa hyödynnetään siiloja ja niiden alla olevia kuljettimia annostelijoina. Tärykuljettimia, joihin tämän työn aiheena oleva heittojousikuljetinkin kuuluu, käytetään usein juuri tällaisissa paikoissa. Heittojousikuljetin tarjoaa muihin tärykuljettimiin verrattuna parhaan säädettävyyden, joten sen käyttäminen annostelutehtäviin on luontevaa. Materiaalivirta saattaa jatkaa matkaansa hihnakuljettimelle, sekoittimelle tai muulle prosessin toimilaitteelle. Tärykuljettimet ja niiden sovelluskohteet ovat yleisesti huonosti tunnettuja. Eräs tämän työn tarkoituksista on lisätä ymmärrystä ja tietoa tärytekniikan sovellusmahdollisuuksista lukijakuntansa ja tekijänsä keskuudessa. Tavoitteena on myös pystyä tarjoamaan asiakaskunnalle nopeasti asiantuntevaa tärykuljetinpalvelua. Prosessiautomaatiossa yhdenkin kriittisen toimilaitteen hajoaminen voi merkitä suuria taloudellisia tappioita. Tämän vuoksi on kaikkien etu, että kuljettimet toimivat ja prosessit pysyvät käynnissä.

Säädettävyytensä ansiosta heittojousikuljetin tarjoaa mahdollisuuden toimia esimerkiksi elintarviketeollisuuden annostelijana, seulana tai erottelijana. Heittojousikuljettimen toimilaitteeksi voidaan valita tapauskohtaisesti paineilma-, hydraulinen tai sähkötäräytin. Tässä työssä keskitytään sähköisellä magneetilla tuotettuun värähtelyvoimaan. Toiminta-ajatus on yksinkertainen; magneetilla venytetään joustia ja vapautuessaan jousi heittää kourua yläviistoon, jolloin kourun päällä oleva aine lentää pienen matkan eteenpäin. Tätä samaa toistetaan tuhansia kertoja minuutissa, jolloin aine kulkeutuu vähitellen eteenpäin. Säädettäviä parametrejä ovat esimerkiksi heittotaajuus ja heiton pituus.



Kuva 1. Heittojousikuljettimen tehonlähteinä voidaan käyttää useita eri toimilaitteita [2]

Kuvan 1 (a) kuvassa heittojousikuljetinta tärisytetään epäkeskomoottorilla, joka on kiinteällä varrella kiinnitetty kouruun. (b) kuvassa epäkeskomoottori on kiinnitetty suoraan kouruun ja värähtely suuntautuu jousien sallimiin suuntiin. Kuvassa (c) kourua poikkeutetaan tasapainoasemasta sähkömagneetilla ja kuvan (d) mallissa kouru värähtelee hydraulili- tai paineilmasylinterin männän liikkeen mukaan.

Kuljettimen toiminnan kannalta tärkeää on huomioida kuljetettavan tavarain paino, tiheys ja haluttu massavirtaus. Myös kuljetettava matka on syytä ottaa huomioon. Suunnittelutyössä on huomioitava esimerkiksi toimintaympäristön lämpötila, räjähdysalttius, hygieniasäännökset ja käytössä oleva kokonaistila. Lisäksi huollettavuus ja varaosien saatavuus on syytä huomioida kuljetinta suunniteltaessa. Heittojousikuljettimen suunnittelija valitsee lopulta sopivan kokoluokan toimilaitteen kuljettimen päämittojen mukaan.

Alalla toimivien suurien tehdasvalmistajien toimittamat laitteet ovat usein valmiita kokonaisuuksia, joista löytyy valmiiksi mitoitettuja kourut, jouset ja toimilaitteet. Valmiiden kuljetinkokonaisuuksien muokkaaminen jälkikäteen on vaikeaa ja juuri sopivan kuljettimen tilaaminen suurelta ja usein ulkomaiselta toimijalta on vaikeaa. Tämän vuoksi pienen suomalaisen yrityksen on helpommin mahdollista suunnitella ja toteuttaa mittatilaustyönä juuri oikeanlainen kuljetin asiakkaan tarpeisiin. Eräs tämän työn keskeisimmistä tavoitteista on löytää magneetin ja sen vastakappaleena toimivan ieksen välisen ilmvälän vaikutus magneetin vetovoimaan sekä magneetin vaatimaan virtaan ja jännitteeseen.

Heittojousikuljetin soveltuu hyvin monenlaisiin käyttöympäristöihin, johtuen sen yksinkertaisuudesta ja helposti puhtaana pidettävästä rakenteestaan. Heittojousikuljettimessa ei myöskään ole kitkaa ja lämpöä tuottavia laakereita, joten sen käyttö on mahdollista myös räjähdysherkän tavarain kuljettamisessa. Tyypillisiä käyttökohteita ovat elintarviketeollisuuden, prosessiteollisuuden ja maataloustuotteiden kuljettimet. Käytännössä kuljettimen

käyttökohteita rajoittaa vain mielikuvitus. Äärimmäisin käyttösovellutus löytyy Kuun ja Marsin pinnoilta kerättyjen regoliittipartikkeleiden kuljettimesta. [6]

Heittojousikuljetin valitaan usein lyhyen ja keskimatkan kuljettimeksi, pidemmät kuljetusmatkat suoritetaan monesti liukuhihnoilla, ruuvikuljettimilla tai alipainejärjestelmillä. Hyvin kevyet, jauhomaiset ja nestemäiset aineet ovat haastavia heittojousikuljettimen kuljetettavaksi, koska ne joko absorboivat heittovoiman itseensä tai heittovoima ei välity niihin riittävästi.

Erilaisia teknisiä ratkaisuja hyödyntäen heittojousikuljetinta voidaan käyttää materiaalin kuivaamiseen, pölynkeräykseen, luokitteluun, annosteluun, tiivistämiseen, murskaamiseen, siivilöintiin jne. Näistä tyypillisimpiä sovelluskohteita ovat tärykuljettimet, syöttimet, tärynostimet ja siilojen jakelulaitteet. [5 ja 6]



Kuva 2. Heittojousikuljetin elintarviketehtaalla [8]

Kuvassa 2 heittojousikuljetinta käytetään tuore- ja pakastevihannesten kuljettamiseen elintarviketehtaalla. Prosessi voi koostua useista perättäisistä ja rinnakkaisista heittojousikuljettimista, joita ohjataan tehtaan ohjausjärjestelmällä. Kuljettimien toimintaa seurataan ja ohjataan usein kuljettimien pinnankorkeusantureiden ja monipäävaakojen antamien tulosten perusteella. Heittojousikuljetin mahdollistaa prosessiaineksen tarkan annostelun.



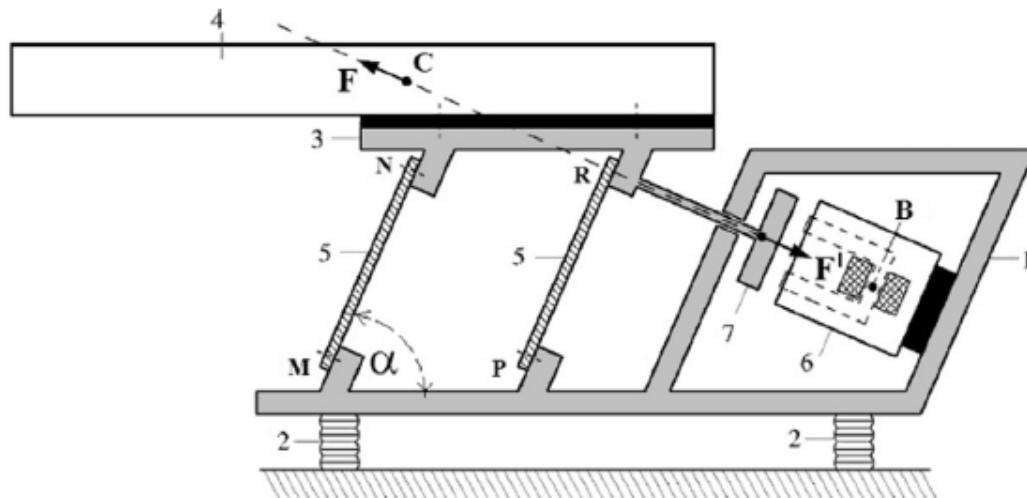
Kuva 3. Monipäävaakaan syötetään ruoka-aineksia neljällä heittojousikuljettimella [7]

Monipäävaakaa (kuvassa 3) käytetään esimerkiksi pussituksissa, kun tavoitteena on saada jokaiseen pussiin saman painoinen erä tuotettua ainesta. Tasapuolinen pussituspaino on tärkeä osa asiakkaan ostokokemusta ja tämän vuoksi elintarvikepuolella tämän yksityiskohdan hiomiseen on syytä käyttää voimavaroja.

2. TEORIA

Heittojousikuljettimen toiminnassa ja suunnittelussa hyödynnetään samoja fysiikan lakeja, kuin mekaniikkasuunnittelussa yleisestikin. Kuljettimelta vaaditaan riittävästi voimaa ja nopeutta sekä rakenteilta tarvittava määrä kestävyyttä. Teholähteinä voidaan käyttää monenlaisia mekaanista värinää tuottavia toimilaitteita, kuten paineilmatäryjä, sähköisiä epäkeskotäryjä, hydraulisia epäkeskotäryjä tai sähköisiä magnetismiin perustuvia täryjä. Näistä jälkimmäinen tarjoaa parhaan säädettävyyden ja erinomaisen hyötysuhteen.

Resonanssitaajuuden hallitun käytön ansiosta heittojousikuljettimilla saadaan aikaiseksi pienellä energialla suuria kiihtyvyyksiä ja heittoamplitudeja. Kiihtyvyyksien ja heittoamplitudien säätämisellä mahdollistuu erilaisten materiaalien kuljetus. Suurten kiihtyvyyksien seurauksena kuljettimen rakenteisiin kohdistuu suuria voimia. Ne on huomioitava rakenteita suunniteltaessa. Kuljettimen rakenteisiin tulee lisätä vahvikkeita sellaisiin kohtiin, joista ne saattavat hajota jatkuvan värinän vaikutuksesta. Tällaisten kohtien löytämiseen voidaan käyttää 3D-mallinnuksessa mukana tulevaa FEM-analyysiä ja kokemuksen tuomaa tietämystä.



Kuva 4. Tyypillinen rakennekuva magneettikäyttöisestä heittojousikuljettimesta. [5]

Kuvassa 4 on esitelty hyvin tyypillinen heittojousikuljettimen rakenne. Laite koostuu kourusta tai putkesta (nro. 4), johon kuljetettava aines tulee. Materiaalin kulkusuunta on kuvassa oikealta vasemmalle. Kouru kiinnittyy jousien (nro 5) päällä lepäävään alustaan joko pulteilla ja muttereilla tai suoraan hitsaamalla. Jouset kiinnittyvät alapäästään heittojousikuljettimen runkoon (nro 1). Alustaan kiinnitetty ies (nro 7) ja runkoon kiinnitetty magneetti (nro 6) vastaavat liike-energian tuottamisesta kuljettimeen. Runko on useim-

miten reilusti kourua ja sen lastia painavampi, jotta kourusta runkoon kohdistuva vastavoima ei saisi aikaan suurta liikettä rungossa. Täysin paikallaan runko ei kuitenkaan pysy vaan runkokin värisee. Rungon alaosaan on kiinnitetty värinänvaimentimet (nro 2). Ilman värinänvaimentimia rungon värinä välittyisi metallirakenteita pitkin ympäri teollisuushallia. Tästä aiheutuu meluhaittaa ja rakenteiden väsymistä. Pahimmillaan tärinä saa aikaan resonanssi-ilmiön, joka voi aiheuttaa vahinkoa myös kuljettimen ulkopuolisissa rakenteissa.

Magneettitoiminen heittojousikuljetin värähtelee tyypillisesti tuhansia kertoja minuutissa. Heittotaajuuteen vaikuttavat esimerkiksi magneetin sähköiset ominaisuudet, jousien ominaisuudet, kiinnityskulma ja määrä, kourun ja kuljetettavan aineksen massa ja ominaisuudet sekä heittoliikkeen amplitudi. Useat edellä mainituista ominaisuuksista vaikuttavat toinen toisiinsa. Kaikkia niiden tarkkoja keskinäisiä vaikutuksia ei tunneta. Vuonna 2008 Kenian Nairobissa tehdyssä tutkimuksessa onnistuttiin simuloimaan heittojousikuljettimen toimintaa hyvin ja simuloinnin tulokset saatiin verifioitua reaali maailman heittojousikuljettimen toimintaa mittaamalla. Näissä malleissa ei kuitenkaan huomioitu kuljetettavaa ainesta millään tavalla. Kouru oli siis tyhjä kaikissa mittausten vaiheissa. [5]

2.1 Kourun ja putken ominaisuudet

Kourun tai putken valinta on ensimmäinen askel halutun laista kuljetinkokonaisuutta suunniteltaessa. Tärkeimpiä suunnitteluun vaikuttavia tietoja ovat kuljettimelle käytössä olevan tilan määrä ja muoto. Myös kuljetettava matka ja kuljetettavan aineksen toivottu tilavuus- ja massavirta vaikuttavat suunnitteluun merkittävästi. Tässä vaiheessa on toivottavaa, että kuljetettava aines on varmistettu soveltuvaksi heittokuljettimella kuljetettavaksi.

Ympäristön hygieniä ja räjähdysherkkyysvaatimukset vaikuttavat materiaalien ja pintojen muotovaatimuksiin. Elintarviketeollisuudessa pintojen tulee olla mahdollisimman helposti pestäviä, eikä ylimääräisiä taskuja saa jäädä bakteeripesäkkeiksi. Toisaalta joissakin tapauksissa vaaditaan suljettua putkea kuljettimeksi, jotta kuljetettavan tavarankokoon ei pääse ulkopuolisia aineksia tai kuljetettavaa ainesta ei pääse lentämään ulos suljetusta järjestelmästä. Esimerkiksi pähkinäallergisille ihmisille on hyvin tärkeää, että heidän ruokansa sekaan ei pääse pieniäkään määriä pähkinää. Rakentamalla kuljettimista suljettuja voidaan estää vieraiden ainesten pääsy osaksi prosessituotetta.

Asennettavuus, rakennettavuus ja huollettavuus on otettava huomioon kuljetinkourua tai -putkea suunniteltaessa. Liian pitkät yhtenäiset rakenteet ovat vaikeita valmistaa ja kuljettaa ehjänä paikalleen. Lisäksi huoltaminen ja puhdistaminen ovat vaikeita toimenpiteitä ilman asianmukaista suunnittelua. Kuljetettavan aineksen mekaaninen ja kemiallinen kuluttavuus kuljettimen pinnalle ovat merkityksellisiä asioita. Esimerkiksi sora saattaa pitkällä aikavälillä kuluttaa teräspintoja, jolloin voi olla aiheellista lisätä kuljettimen pinnalle vaihdettavia kulutuslevyjä.

Toivottu tilavuusvirta ja haluttu kuljetusmatka määräävät pitkälti kuljettimen pituuden ja halkaisijan. Valittu putki tai kouru pyritään pitämään mahdollisimman kevyenä, mutta samalla riittävän jäykkänä. Kuljetinkourun tai -putken ja kuljetettavan aineksen massa ovat tärkeä osa kuljettimen suunnittelua. Edellä mainitut määräävät pitkälti vaaditun heittovoiman.

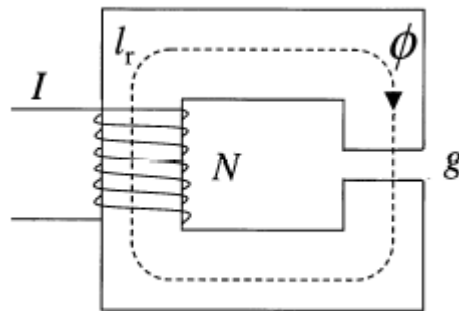
2.2 Magneetin ominaisuudet

Magneetin ja ieksen välille syntyvä voima liikuttaa kourua ja siitä saatava energia varastoidaan jousiin. Magneetti pyritään saada toimimaan niin, että se toimisi hyvin lähellä heittojousikuljettimen resonanssitaajuutta. Resonanssitaajuudella toimimisessa on se etu, että vaaditun energian määrä on suhteellisen pieni. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että magneetti vetää iestä puoleensa vain silloin, kun kouru on jousen toiminnan luonteesta johtuen tulossa kohti magneettia. Pyritään siis kasvattamaan värähtelyä vahvistamalla jo olemassa olevaa liikettä, eikä sammuttamaan sitä. Haasteena on magneetin vetovoiman oikea ajoittaminen. Magneetin kelan sähköisistä ominaisuuksista johtuen vetovoimaa ei saada kytkettyä päälle on/off-periaatteella, vaan magneetilla on esimerkiksi de-magnetoitumisaika Lenzin laista johtuen.

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1)$$

jossa e on itseinduktioituva jännite, L käämin induktanssi, ΔI virran muutos käämissä ja Δt kulunut aika. Itseinduktoitunut jännite synnyttää virran käämiin, josta aiheutuu magneettikentän muutosta vastustava magneettikenttä.

Toinen haaste liittyy kourun päällä olevan kuorma muutoksiin. Suurempi kuorma pienentää järjestelmän ominaistaajuutta ja pienempi kuorma vastaavasti kasvattaa ominaistaajuutta. Oikeaoppisella takaisinkytkennällä magneettia saadaan ohjattua järkevästi.

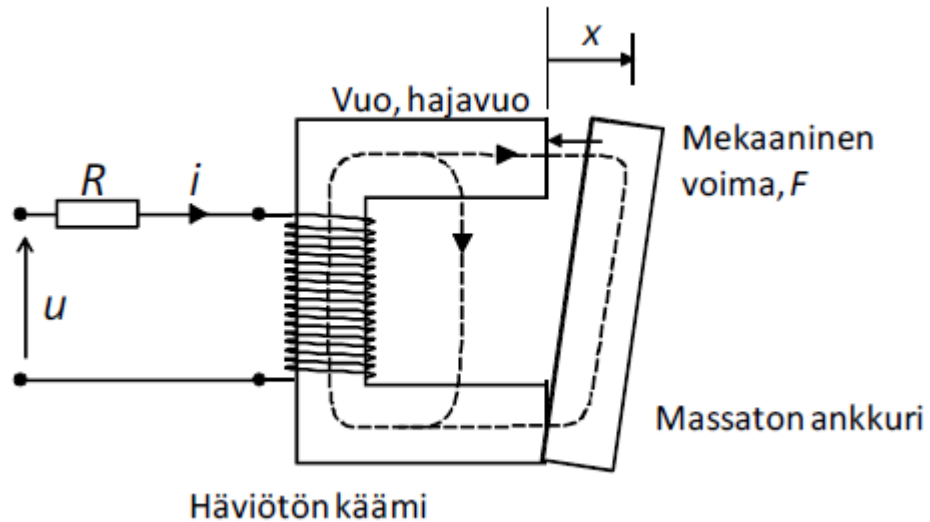


Kuva 5. Yksinkertainen ilmavälillinen magneettiipiiri [3]

Kuvassa 5 on esitelty heittojousikuljettimessa käytetyn magneetin toiminnan takana olevan magneettiipiirin rakenne. Kuvassa I tarkoittaa käämille syötettyä virtaa, N kuvaa käämin kierrosten lukumäärää, l_r magneettivuon kulkeman matkan pituutta, Φ kuvaa magneettivuota ja g tarkoittaa ilmavälin pituutta.

$$F_m = NI = H_r l_r + H_g g = \Phi R_m \quad (2)$$

Kaavassa 2 on esitelty ns. laajennettu magneetti- ja sähköteorioiden Ohmin laki, jolla voidaan laskea magnetomotorinen voima F_m . Kaavassa N kuvaa käämin kierrosten lukumäärää, l magneetti- ja sähköteorioiden pituutta, H_r magneettikentän voimakkuus raudassa, l_r magneettikentän pituus raudassa, H_g magneettikentän voimakkuus ilmassa, g ilmassa olevan pituus, Φ magneettivuon ja R_m kokonaisreluktanssi magneetti- ja sähköteorioiden piirissä.

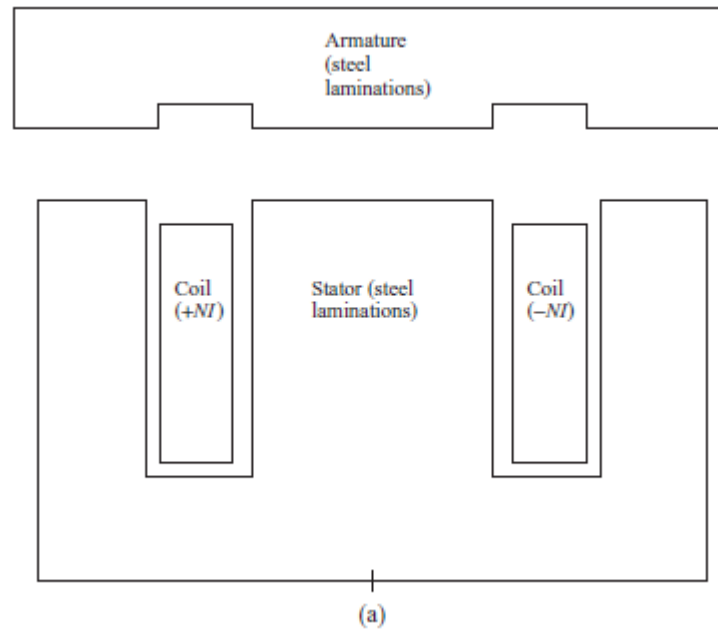


Kuva 6. Rakennekuva magneetin ja ankkurin, eli ieksen välisestä kytkennästä [3]

Kuvassa 6 on esitelty periaatekuva magneetin käämistä, rautasydäimestä ja ieksestä. Toiminta perustuu käämin läpi johdettuun virtaan, joka indusoi magneettivuon itsensä sisälle. Indusoitunutta magneettivuota pyritään ohjaamaan rautasydäimen läpi kohti iestä. Ieksen ja magneetin rautasydäimen välille muodostuu ilmaväli, jossa magneettivuon kulkeutuminen on huomattavasti vaikeampaa johtuen ilman suhteellisen pienestä permeanssista Λ [H Henry], eli magneettisesta johtavuudesta. Rautasydäimen ja ieksen välille ilmaväliin syntyy myös ilmassa kiinni painava voima, jota hyödynnetään heittojousikuljettimen kourun värähtelyssä. Ideaalitilanteessa koko käämin tuottama magneettivuon kulkeutuisi päävuon mukana rautasydäimen ja ieksen läpi, mutta käytännössä näin ei ole. Osa magneettivuosta muodostaa hajavuo, joka kulkeutuu ieksen ohi takaisin käämin sisään.

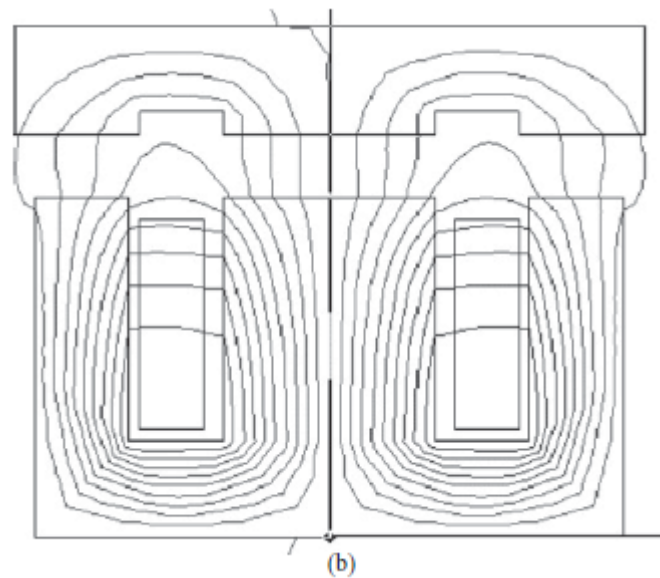
$$F = - \frac{A_g B_g^2}{2\mu_0} \quad (3)$$

Kaavassa 3 on esiteltynä yksinkertaistettu funktio ilmassa kiinnipainavan voiman laskemiseksi. A_g tarkoittaa ilmassa olevan poikkipinta-alaa, B_g tarkoittaa magneettivuon tiheyttä ilmassa ja μ_0 kuvaa tyhjiön permeabiliteettiä.



Kuva 7. Havainnekuva tässä työssä käytössä olleesta magneettitoimilaitteesta [1]

Kuvassa 7 näkyy magneetin ja sen ieksen poikkileikkaus. Käämi on upotettu rautasydämen sisään, jotta syntyvällä magneettivuolla olisi mahdollisimman häviötön tie kulkea magneetista iekseen ja takaisin magneettiin.

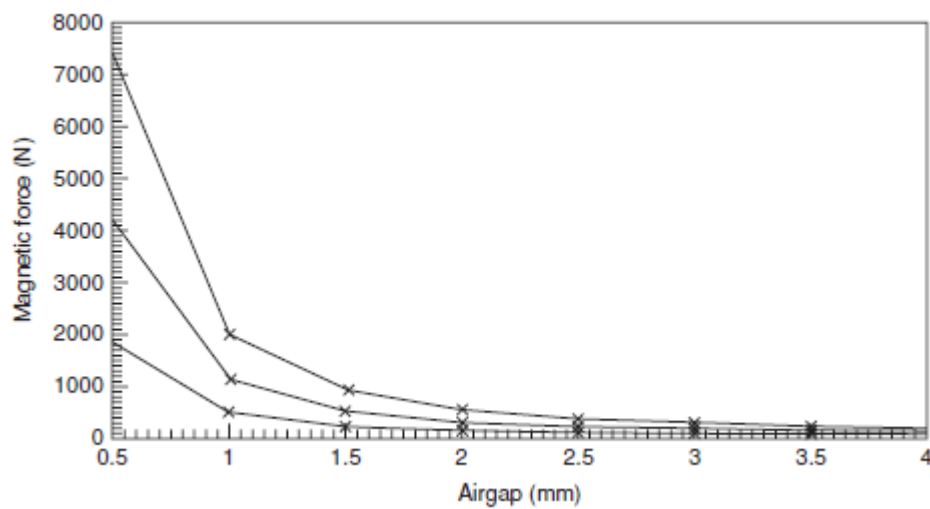


Kuva 8. Havainnekuva magneetin ja sen ieksen läpi kulkevasta magneettivuosta [1]

Kuvassa 8 näkyy tarkemmin magneettivuon mahdollinen kulkureitti. Kuvasta voidaan heti nähdä, että hajavuota esiintyy suhteellisen paljon. Suuri osa kenttäviivoista ei kulje ieksen läpi ollenkaan, vaan löytää itselleen lyhyemmän ja helpomman tien takaisin käämin sisälle.

$$F = (\mu_0 NI)^2 \frac{2S}{4g^2 2\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 I^2 S}{4g^2} \quad (4)$$

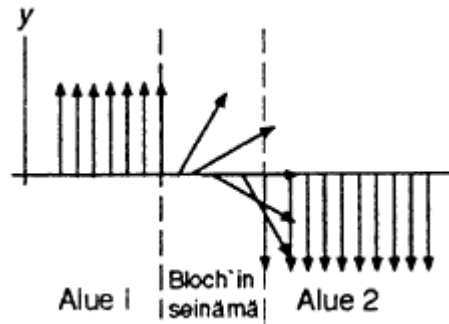
Magneettia ja sen iestä toisiaan kohti kiinni painava voima voidaan laskea tarkemmin likiarvokaavalla 4, jossa toistuvat samat suureet kuin aiemmissakin yhtälöissä 2 ja 3. Uutena suurena mainitaan S , jolla merkitään yksinkertaistaen navan pinta-alaa. Molempien napojen pinta-alojen oletetaan olevan samat. Lisäksi kaavassa oletetaan raudan permeabiliteetin olevan ääretön. Kaavasta nähdään, että teoriassa ilmapäliä kiinni painava voima on suuresti riippuvainen käämin kierrosten lukumäärästä, syötetystä virrasta ja ilmapälin pituudesta. Kaikki edellä mainitut suureet kasvattavat tai pienentävät voimaa toisessa potenssissa.



Kuva 9. Magneettinen voima ilmapälin funktiona [1]

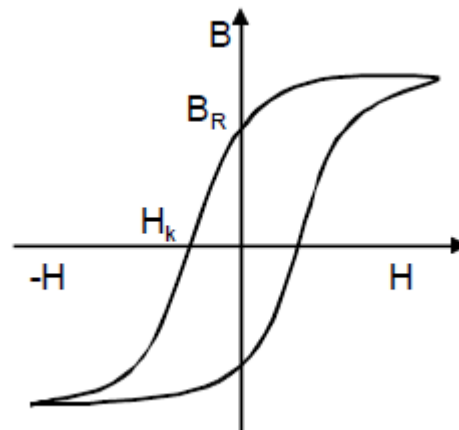
Magneettipiiriä sulkevan voiman lukuarvoja on laskettu kuvassa 9 näkyvässä kuvaajassa. Lukuarvojen laskemiseen on käytetty kaavan 4 funktiota. Kuvaajassa näkyvät käyrät ovat piirretty 2, 3 ja 4 A virroilla. Ilmapälin ja käämille syötetyn virran merkitys on merkittävä magneettisen voiman suuruuden kannalta.

Rautasydän on rakenteeltaan vastaavan tyyppinen, kuin muuntajissa olevat rautasydämet. Rautasydän koostuu ohuista (<1 mm) päällekkäin ja kulmissa lomittain ladotuista laminoiduista metallilevyistä, joilla on suuri permeabiliteetti. Permeanssi on laskennallinen suure, joka määräytyy aineen permeabiliteetin, magneettipiirin poikkipinta-alan ja magneettipiirin pituuden mukaan. Laminoidun pinnan tarkoituksena on toimia eristekerroksena indusoituvien sähkövirtojen varalle. Rautasydämen läpi kulkeva vaihteleva magneettivuo indusoi pyörrevirtoja myös sydämen ohutlevyihin. Virrat voivat olla suuriakin, joten sydän pyrkii lämpenemään niiden seurauksena. Lämpeneminen on kuitenkin huomattavasti vähäisempää levyjen ollessa ohuita ja toisistaan eristettyjä verrattuna paksumpiin levyihin.



Kuva 10. Alkeismagneettien kääntyminen ulkoisen magneettikentän mukaiseen suuntaan [3]

Indusoituvien pyörrevirtojen lisäksi rautasydäntä lämmittää myös, makroskooppisella tasolla tarkasteltuna, rautasydämen alkeismagneettien kääntyileminen magneettivuon mukana. Alkeismagneettien kääntymistä ulkoisen magneettikentän suunnan mukaisiksi (kuvassa 10) kutsutaan Barkhausen-ilmiöksi. Alkeismagneettien kääntyminen kasvattaa käämin tuottamaa magneettivuota entisestään. Alkeismagneettien kääntyileminen tuottaa lämmön lisäksi myös epälineaarisuutta magneettipiirin toimintaan johtuen rautasydämen magnetoitumiskäyrän hystereesistä.



Kuva 11. Magneetin rautasydämen magnetoitumisessa syntyvä hystereesikäyrä [3]

Kuvassa 11 näkyy magneetin rautasydämen ideaalinen magnetoitumiskäyrä. Y-akselilla oleva B tarkoittaa magneettivuon tiheyttä [Wb] ja x-akselilla oleva H tarkoittaa magneettikentän voimakkuutta [A/m]. Käytännössä ideaalinen magnetoitumiskäyrä ei ole kuvan mukainen, vaan käyrään summautuu yliaaltoja, rautasydämen kyllästymisen saattaa aiheuttaa poikkeamia käyrään. [opetusmoniste] Lisäksi ilmarako aiheuttaa ilmarakoa kiinni painavaan voimaan epälineaarisuutta.

Magneetteja löytyy teollisuudesta erittäin nopeaankin käyttöön, kuten autojen common-rail-suuttimiin ja hydraulisiin servoventtiileihin, mutta niissä vaaditut voimat ovat aivan eri luokkaa, kuin heittojousikuljettimissa. Servoventtiileissä käytettyjen solenoidien erikoisominaisuutena on se, että niissä käämin ja karan välinen vetokäyrä on lineaarinen riippumatta karan sijainnista. Commonrail-suuttimissa solenoidin avautumisnopeus on muutamia millisekunteja. Suunnittelu ja tuotekehityksen tuloksena magnetoitumis- ja demagnetoitumisajat ovat onnistuttu pitämään lyhyinä. Edellä mainituissa magneettiventtiileissä fyysinen rakenne eroaa muutenkin heittojousikuljettimissa käytetyistä magneeteista, joten näistä ei voida ottaa suoraa verrokkia tämän työn tarkasteluun.

Heittojousikuljettimiin suunniteltuja magneetteja löytyy teollisuudesta useaa eri kokoluokkaa. Esimerkiksi Reovib tarjoaa WI sarjassaan usean eri värähtelytaajuuden laitteita asiakkailleen, joista karkea luokittelu esillä taulukossa 1.

Taulukko 1. Reovib-valmistajan tarjoamia heittojousikuljettimien magneetteja

Magneetti	Ilmaväli [mm]	RPM / Hz	Virta 200-230 V [A]	Vetovoima [N]
WI 111	1-3	3000-6000 / 50-100	0,065-1,5	5-150
WI 121	3	3000-6000 / 50-100	1,4-13	229-6900
WE 131	0,5-3	3000-6000 / 50-100	0,18-3	
WI 211	1	3000-6000 / 50-100	0,75-1,1	40-210
WI 321	3	900-1500 / 15-25	0,4-8	229-8580
WI 421 1	3	3000-6000 / 50-100	0,68-5,5	128-1400
WI 421 2	3	900-1500 / 15-25	0,39-8	271-8000
WI 621	3	3000-6000 / 50-100	1,2-16,9	229-6900

Taulukossa 1 on esitelty yhteenveto Reovibin magneeteista. Kaikkia edellä mainittuja magneetteja voidaan ohjata Reovibin MFS-sarjan säätimillä. Osaa voidaan ohjata myös MTS-, RTS- tai SMART-sarjan säätimillä. [9]

2.3 Jousen ominaisuudet

Jousen materiaalina käytetään heittojousikuljettimessa erikoivalmisteisia komposiittilevyjä tai metallirakenteisia levyjä. Jousen jäykkyys suhteessa jännitysvoimaan ja kuorman massaan määrittää värähdystaajuuden. Yleissääntönä pätee, että lyhyt jousi on jäykempi kuin pitkä jousi. Jäykkä jousi värähtelee suurella taajuudella, vähemmän jäykkä jousi värähtelee pienemmällä taajuudella. Pitkällä ja matalan taajuuden omaavalla jousella värähdysamplitudi on usein suurempi. Vaikutukset ovat nähtävillä taulukossa 2.

Taulukko 2. Jousien ominaisuuksia

	pitkä jousi	lyhyt jousi
värähtelytaajuus	-	+
värähtelyamplitudi	+	-
kuorman kantokyky	-	+

Suunnittelun kannalta tärkeimmät lehtijousen päämitat ovat jousen leveys, pituus ja paksuus. Jousia määritettäessä pyritään valitsemaan riittävä määrä jousia, jotka kykenevät vähintäänkin kantamaan päälle lastatun kuorman.

Heittoliikettä ja taajuutta optimoitaessa pyritään lähelle järjestelmän resonanssitaajuutta siten, että heittoamplitudi on riittävän suuri, mutta ei kuitenkaan liian suuri missään kuljettimen toiminnan vaiheessa. Liian suuri amplitudi voi aiheuttaa sen, että magneetti ja ies törmäävät toisiinsa tai jousi vaurioituu. Tilannetta, jossa magneetti ja ies hakkaavat toisiinsa, kutsutaan iskukäytöksi. Liian pieni heittoamplitudi pienentää heiton pituutta.

Taulukko 3. Jousen mitoitus taulukkolaskentaa käyttäen

Kourun paino (Kg)	35,2				
Kuljetettavan Materiaalin paino (Kg)	30				
Jousien tukipisteet	4	8	12	16	20
Jousia/tukipiste	1	2	3	4	5
Jousen leveys (mm)	40				
Jousen pituus (mm)	110				
Taajuus (Hz)	30				
Iskun pituus (mm)	6,6				
Jousivakio (N/mm)	366	183	122	92	73
Jousen taivutusvoima (N)	1209	605	403	302	242
Jousen paksuus (mm)	7,58	6,02	5,26	4,77	4,43
Jännitys (Mpa)	173	137	120	109	101

Taulukossa 3 on valittu kuljetinkourun paino, kuljetettavan materiaalin paino, jousien tukipisteitä, jousen leveys, jousen vapaa pituus, työskentelytaajuus ja jousen maksimipoikkeama. Työkalu suosittaa vähintään kahta joustaa tukipistettä kohden, jolloin jousen kestävä taivutuskuorma ei ylitä suositeltua maksimiarvoa. Jousien tulee tällöin olla noin 6 mm paksuiset. Valmistajan mukaan jouset kestävät tilapäisesti ylikuormitusta. Kuljetinkäytössä kuormitus on lähes jatkuvaa.

Heittojousikuljetin pyritään suunnittelemaan siten, että se toimisi mahdollisimman lähellä järjestelmän resonanssitaajuutta, mutta ei kuitenkaan juuri resonanssitaajuudella. On parempi, että järjestelmä lähestyy resonanssitaajuuttaan kuorman kasvaessa. Tällöin toimitaan alikriittisellä resonanssitaajuudella. Monet polttomoottoritkin viritetään siten, että niiden vääntökyky kasvaa kuorman kasvaessa ja kierrosnopeuden laskiessa. Tällä saavutetaan se, että heittojousikuljetin ei pääse sammumaan äkillisten kuormahuippujen aikana. Tämän vuoksi on syytä laskea järjestelmän luonnollinen resonanssitaajuus ja valita jouset sen mukaan. Luonnollisen resonanssitaajuuden laskemiseen on olemassa kaavoja, joita taulukon 3 laskennassa hyödynnetään.

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5)$$

, jossa ω on kulmanopeus $2\pi F$, jossa F on taajuus, m on jousilla lepäävä massa. Tästä saadaan johdettua kaava järjestelmän luonnolliselle värähtelytaajuudelle.

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (6)$$

Usein heittojousikuljetinta suunniteltaessa toivottu ominaistaajuus tulee magneetin tai muun toimilaitteen määrittämänä. Tällöin on syytä laskea ominaistaajuutta vastaava jousivakio ja valita jouset sen mukaan, mitä ominaistaajuus vaatii.

$$K = \left(\frac{F_n}{5,03}\right)^2 * m \quad (7)$$

Jousivakion lisäksi on syytä varmistua jousen pituudesta, leveydestä ja paksuudesta, jotta jouseen ei kohdistu liian suuria jännitysvoimia laitteen toiminnan aikana. Heittojousikuljettimen käyttöön rakennetuilla komposiittijousilla jännitysvoima joustaa kohden ei saisi ylittää 138 MPa arvoa. Pienet satunnaiset ylitykset eivät vielä aiheuta vahinkoa jouselle, mutta jatkuvat ylitykset lyhentävät jousen kestoikää ja toimintavarmuutta. [4]

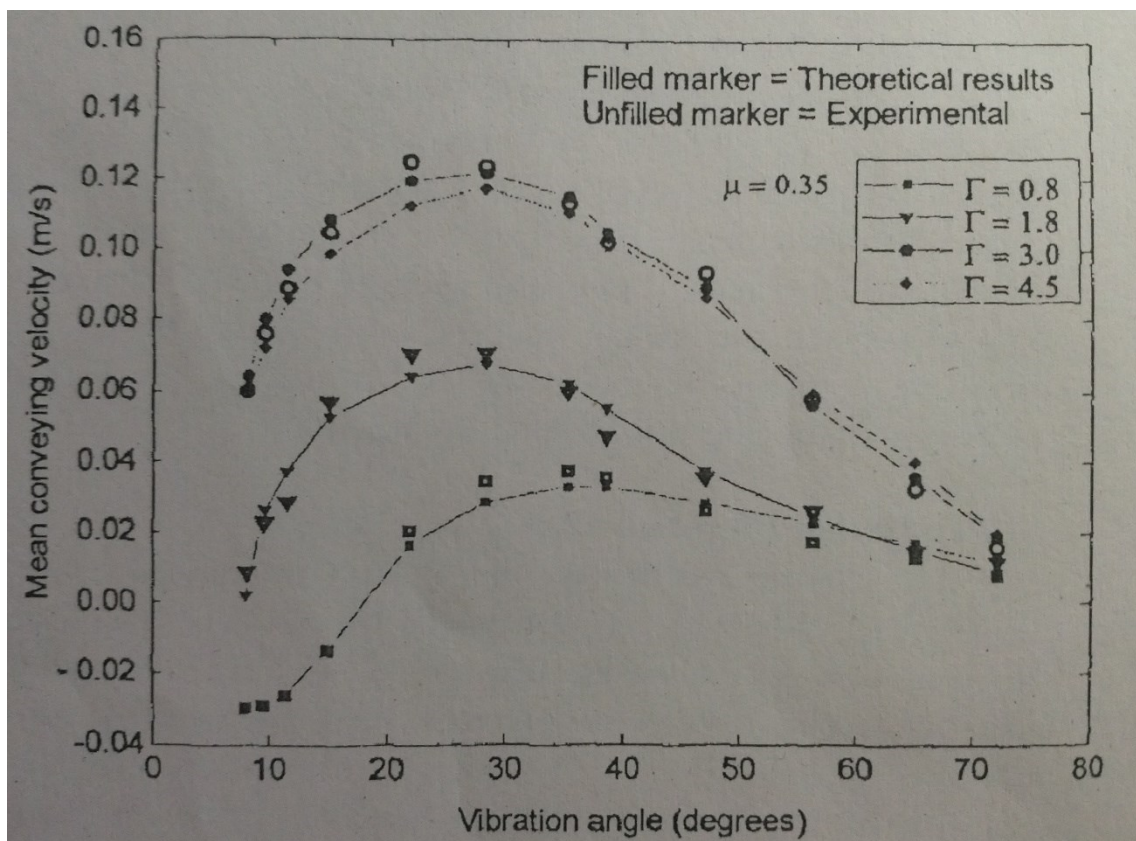
2.4 Heittokulman ja heittoluvun vaikutukset

Heittokulmalla ja niin kutsutulla heittoluvulla on suuri vaikutus toimivan heittojousikuljettimen suunnittelussa. Heittoluvulla (Γ) tarkoitetaan kuljetettavaan kappaleeseen kohdistuvan gravitaatiokiihtyvyyden y-komponentin ja kuljettimen pinnan tukivoiman aiheuttaman kiihtyvyyden suhdetta.

$$\frac{a_n}{g_n} = \Gamma \quad (8)$$

Heittoluvun ylittäessä arvon yksi, kuljetettava kappale irtoaa kuljettimen pinnasta heiton tapahtuessa.

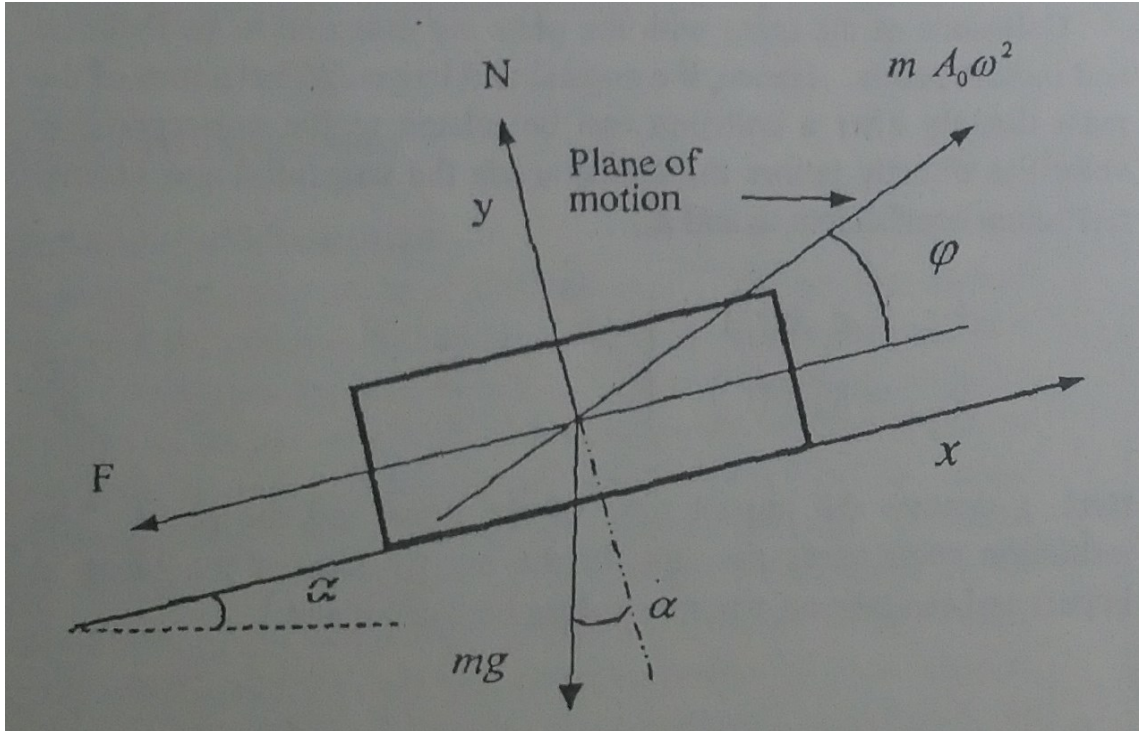
Heittokulmalla taas tarkoitetaan kulmaa, jossa kappale irtoaa kuljettimen pohjasta. Heittokulmaan voidaan vaikuttaa jousien kiinnityskulmaa säätämällä. Jousien kiinnityskulma ei kuitenkaan suoraan kerro heittokulmaa, vaikka onkin hyvin lähellä tuota lukua. Tarkka arvo voidaan laskea.



Kuva 12. Heittoluvun suhde kuljetusnopeuteen [5]

Kuvasta 12 nähdään kuinka heittoluvun muutokset vaikuttavat kuljetusnopeuteen heittokulman funktiona. Heittoluvun kasvattaminen nostaa kuljetusnopeutta, muttei kuitenkaan loputtomiin. Kuvaajasta nähdään kuinka 3.0 heittoluvulla päästään säännönmukaisesti suurempaan kuljetusnopeuteen, kuin 4,5 heittoluvulla. Edellä mainitun artikkelin tekijät

arvelivat tämän johtuvan taaksepäin liu'un suhteellisesta kasvamisesta. Artikkelin tekijöiden mukaan teollisuudessa on vallalla käsitys, että heittoluvun rajaton kasvattaminen parantaa kuljettimen kuljetuskapasiteettiä varauksetta. Saatua tulosta on näin ollen ristiriidassa teollisuudessa vallitsevan käsityksen kanssa. [6]



Kuva 13. Heittoliikkeessä vaikuttavia voimia ja kulmia [5]

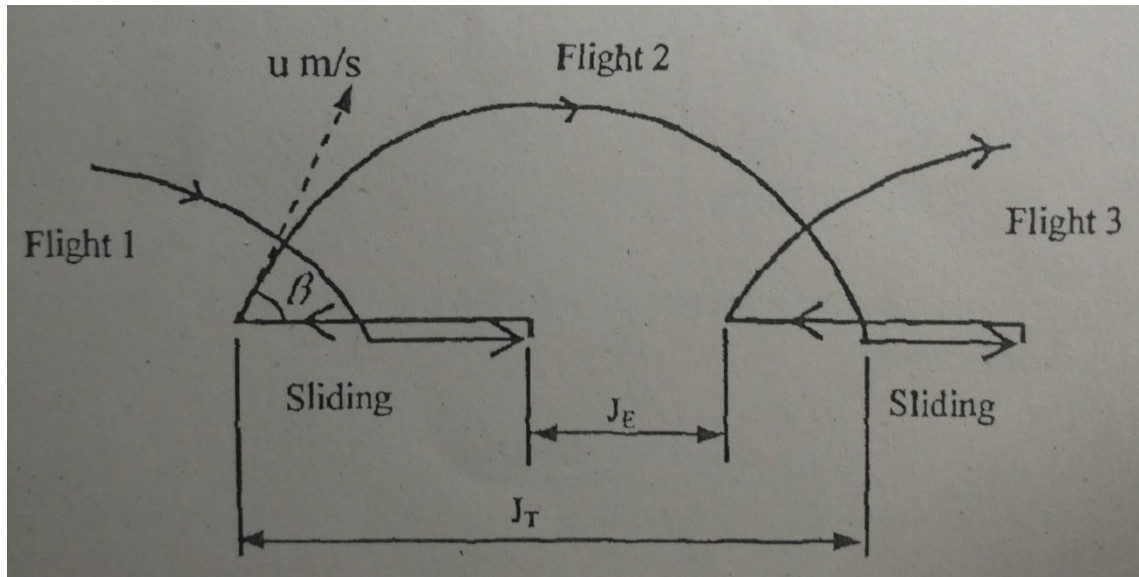
Kuvasta 13 nähdään kuljettimen päällä olevaan kappaleeseen vaikuttavia voimia hetki ennen tapahtuvaa heittoa. Voima F tarkoittaa kitkavoimaa, joka pyrkii hidastamaan kappaleen liukua kuljettimen pinnalla. Voima mg kuvaa gravitaatiovoimaa, josta voidaan johtaa aiemmin kaavassa 8 käytetty kiihtyvyys g_n . Kolmas piirretty voima kuvaa heittovoimaa, joka voidaan laskea kaavalla:

$$F_h = mA_0\omega^2 \quad (9)$$

jossa m on kuljetettavan kappaleen massa, A_0 on heittoamplitudi ja ω kuvaa kuljettimen ominaistajuuksia.

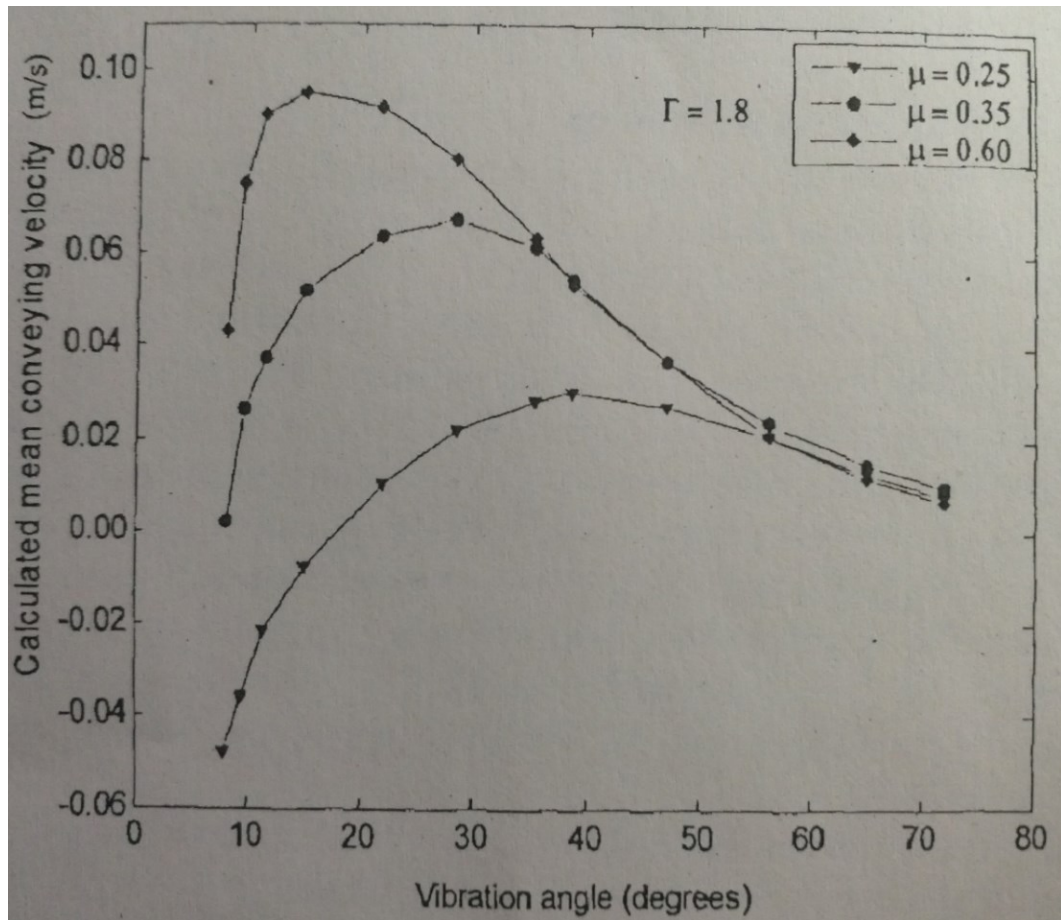
Tyypillisesti teollisuudessa on pyritty maksimoimaan heittoluvun suuruus. Suurella heittoluvulla saadaan kuljetettavaan kappaleeseen kohdistumaan suuri heittovoima, mutta julkaisussa: "Optimum Vibration Angle for Transporting Granular Materials on Linear Conveyor", todetaan tämän olevan osittain virheellinen ajatusmalli haluttaessa nopeasti kuljettavaa heittojousikuljetinta. Ongelmaksi muodostuu kuljetettavan kappaleen liiallinen liukuminen taaksepäin ja kuljettimeen törmääminen väärin mitoitettuna ja ajoitetun heittoliikkeen seurauksena. Kappaleen törmäämisestä kuljettimeen voi seurata vahinkoa

kuljetettavalle tavaralle, kuljettimen pinnalle ja magneetin kuluttama energia kasvaa turhaan. [6]



Kuva 14. Heittoliikkeen vaiheet [5]

Kuvassa 14 on esitetty heittoliikkeen vaiheet. Vaiheiden ulkoasuun vaikuttaa jo aiemmin mainittujen heittokulmien ja voimien lisäksi kappaleen itsensä ominaisuudet, kuten kappaleen muoto, massa ja kitkaparametrit. Ideaalisessa kuljettimessa kulkeutuminen on nopeaa ja vähän kuljetinta sekä kuljetusmateriaalia kuluttavaa. Taaksepäin liukuminen olisi syytä minimoida. Kappaleiden tulisi laskeutua kuljettimen pinnalle vasta siinä vaiheessa, kun heitto suuntautuu eteenpäin. Huonoimmillaan kuljetettavat kappaleet putoavat kourun pinnalle kourun ollessa matkalla taaksepäin. Tästä aiheutuu epätoivottu impulssi kourun ja kuljetettavan materiaalin välille. [6]



Kuva 15. Kitkakertoimen ja heittokulman välinen yhteys [5]

Kuvasta 15 nähdään kitkakertoimen ja heittokulman välinen suhde. Yllä olevat tulokset on saatu heittoluvulla 1,8. Nyrkkisääntö on, että pienemmän kitkakertoimen omaava aines vaatii suuremman heittokulman ja suurempi kitkakerroin vaatii pienemmän kulman.

Täysin yleispätevää sääntöä optimaalisen heittokulman ja heittoluvun suuruudesta vaikeaa tai mahdotonta laskea. Aiemmin mainitussa julkaisussa annettiin kuitenkin melko hyvät likiarvot, joiden sisältä oikeaa heittokulmaa on syytä hakea. Kappaleen ja kuljettimen välisen kitkakertoimen pienentyessä näyttäisi optimaalisen heittokulman lukuarvo kasvavan. Vastaavasti hyvällä kitkalla varustettu kappale tarvitsee pienemmän heittokulman optimaalisen kuljetusnopeuden saavuttamiseksi. [6]

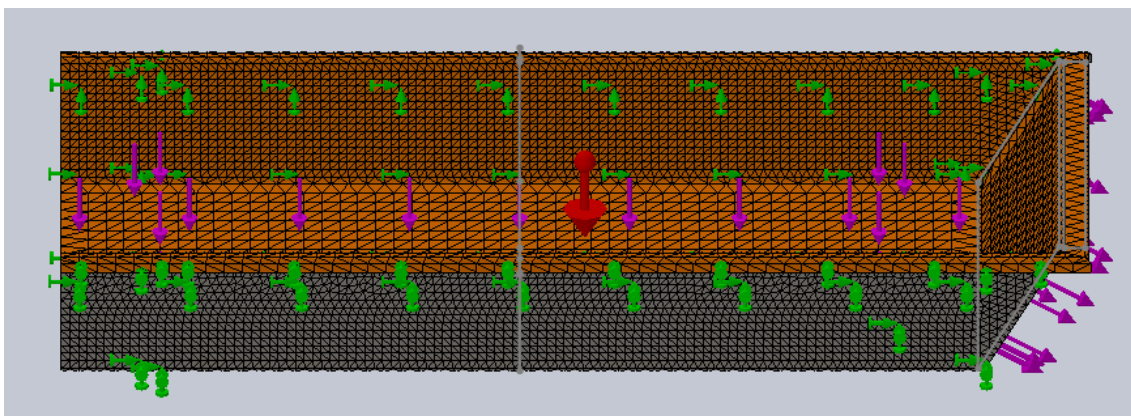
Yhteenvedon voidaan sanoa, että heittojousikuljetin vaatii kuljettamisen onnistumiseksi vähintään yhden g kiihtyvyyden, jotta kuljetettava aines saadaan irtoamaan kuljettimen pinnasta ja heitto alkaa. Kiihtyvyyttä voidaan kasvattaa tapauskohtaiseen raja-arvoon saakka, jonka jälkeen lisäystä kiihtyvyydestä ei ole hyötyä kuljetusnopeuden kannalta. Heittokulman tulee olla useimmiten 20-40° välillä. Sopiva heittotaajuus ja heiton pituus riippuvat ainakin kappaleen kitkaominaisuuksista. Heittoliikkeessä on syytä pyrkiä materiaalin liitoon kuljettimen pinnalla raa'an voiman sijaan.

3. HEITTOJOUSIKULJETTIMEN SUUNNITTELU

Heittojousikuljettimen suunnittelu on monella tapaa hyvin tyypillistä koneen suunnittelua. Useat eri suunnitteluparametrit vaikuttavat toinen toisiinsa, joten yhden osan muuttaminen voi aiheuttaa suuren lisätyön. Hyvä esimerkki tästä on kourun rakenteen muuttaminen. Kourun tulee olla riittävän jäykkä, jotta heittoenergiaa ei kuluisi kourun muodonmuutoksiin. Jäykkyyttä voidaan kasvattaa tekemällä kanttauksia kourun kylkirakenteisiin ja hitsaamalla tukipaloja vahvikkeiksi. Näiden lisääminen kasvattaa kuitenkin kourun massaa ja tämä taas johtaa suurempiin vaadittuihin voimiin magneetilta ja heittojousilta. Osan vaihtaminen toiseen aiheuttaa usein rakenteellisia muutoksia myös muihin osiin, koska uusi osa ei välttämättä mahdu edellisen tilalle. Fyysisten mittojen lisäksi on huomioitava erilaiset laitteen toiminnan kannalta merkittävät suunnittelusäännöt. Oman lisänsä tuo rakenteiden kustannustehokkuus. Suunnittelijan on helppo piirtää monimutkaisiakin 3D-malleja eri kappaleista, mutta niiden rakentaminen voi olla vaikeaa, aikaa vievää ja kallista. Yksinkertaiset muodot ja valmiita putkia ja palkkeja hyödyntävät rakenteet ovat usein parempia rakennettavuuden kannalta. Tulevaisuudessa 3D-tulostamisen yleistyessä edellä mainittujen määreiden merkitys saattaa pienentyä.

3.1 Kourun kestävyuden varmistaminen

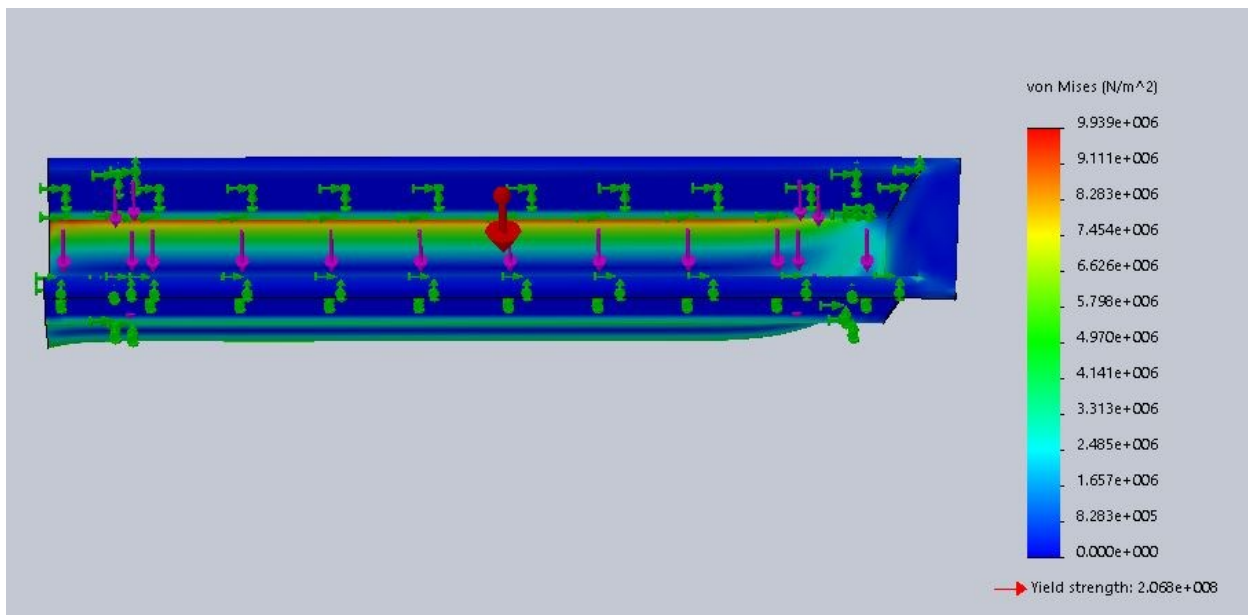
Solidworksin opiskelijalisenssi tarjoaa kattavan määrän erilaisia työkaluja suunniteltujen kappaleiden lujuuden ja kestävyuden määrittämiseksi. Kohtalaisella asiaan perehtymisellä saa näkyviin monenlaisia graafiseen ulkoasuun puettuja kuvaajia. Tämän työn kannalta kriittisin jäykkyyttä ja kestävyyttä vaativa yksittäinen komponentti on kuljettava kouru. Solidworks tarjoaa työkaluja myös suurempien kokonaisuuksien lujuuslaskentaan, mutta niiden käyttäminen on paljon haastavampaa.



Kuva 16. Solidworksin verkottama kouru

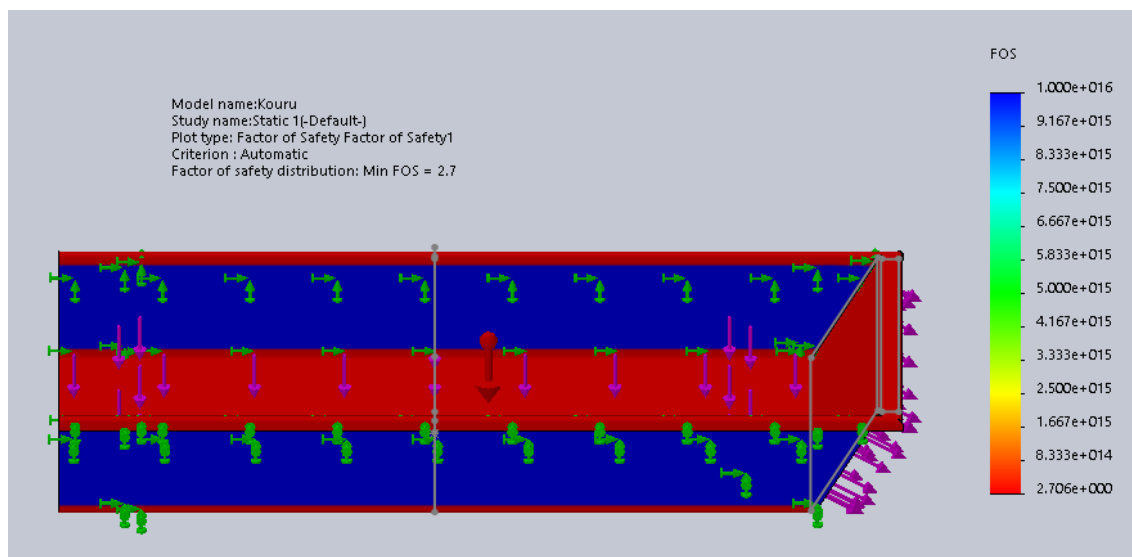
Kuvassa 16 nähdään Solidworksin verkottama kouru. Verkottamisessa haastavia kohtia ovat hitsausseamit ja terävät kanttaukset. Verkotuksella pyritään kertomaan tietokoneelle

kappaleen fyysinen rakenne. Mikään simulaatio ei ole koskaan täysin todellisuutta vastaava, vaan parhaimmillaankin ne tarjoavat vain likiarvoja, joita suunnittelija käyttää hyödykseen rakennetta mitoittaessaan. Tässäkin verkotuksessa ja voimien mitoituksessa on tehty pyöristyksiä ja yksinkertaistettu asioita. Kourun päällä kuljetettava materiaali on jakautunut tasaisesti koko kourun pohjapinta-alalle, magneetin vetovoima kohdistuu suoraan takaseinän peltiin ja jousien antama tukivoima jakautuu koko kyljen matkalle.



Kuva 17. Solidworksin fem-analyysiä hyödyntävä jännitekaavio.

Kuvassa 17 on esitelty eräs Solidworksin tarjoama työkalu kappaleen kestävyuden laske-
miseksi ja määrittämiseksi. Yllä olevassa kuvassa on esitetty laskelma fem-analyysiin
perustuvasta graafisesta kuvaajasta, joka kertoo kourun eri osiin kohdistuvien jännitysten
voimakkuuksista. Kuvan perusteella voidaan todeta, että kourun pohjaan ja pohjan kant-
tauksiin kohdistuu suhteessa suurin jännitysvoima. Ongelmaan saadaan ratkaisu esimer-
kiksi hitsaamalla kourun pohjaan poikittaistukia.



Kuva 18. Solidworksin esitys kourun varmuuskertoimista

Kuvasta 18 nähdään vielä samaa asiaa varmuuskertoimien näkökulmasta. Kourun pohja ja peräseinämä ja reunakanttaukset vaikuttavat olevan heikoimmat lenkit.

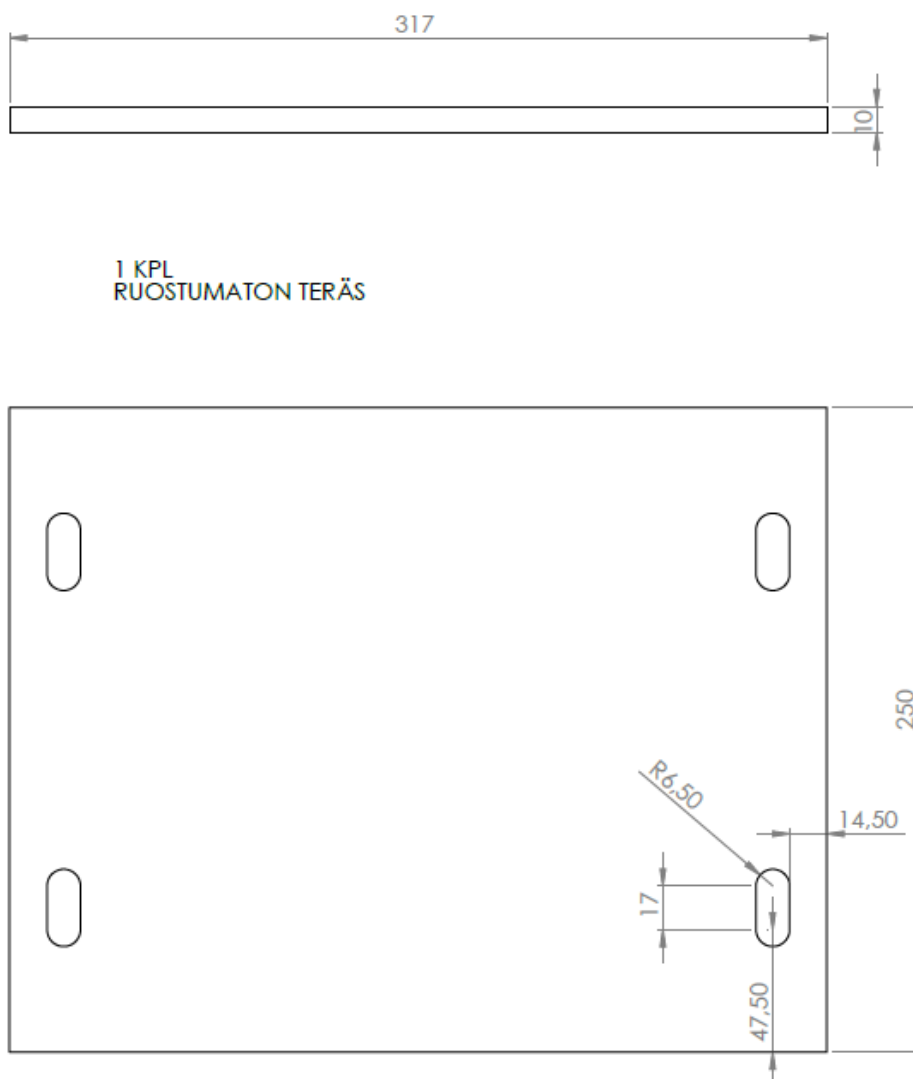
3.2 Osien suunnittelu

Osien suunnittelussa pyritään yksinkertaisuuteen. Suositeltavaa on käyttää johdonmukaisesti samoja materiaalivahvuuksia mahdollisimman paljon, hyödyntää jo olemassa olevia osia ja uusia osia teetettäessä kannattaa huomioida myös tulevien projektien tarpeet. Osien tulee olla rakennettavuudeltaan selkeitä ja vähän ylimääräistä työstöä vaativia. Suunnittelijan tehtävänä on ajatella ja piirtää jokainen työvaihe sillä tarkkuudella läpi, että osien kokoonpanovaiheessa ei tarvitse miettiä tai päätellä mitään. Suunnittelijan piirtämien osakuvien tulee olla yksiselitteiset ja helppolukuiset. Käytäntö on kuitenkin opettanut, että inhimillisen erehdyksen ja väärinkäsityksen vaara on jatkuvasti olemassa. Esimerkiksi kahden kappaleen välillä oleva epäkeskeinen ympyräleikkaus on houkutteleva kohde rakentaa keskeiseksi, vaikka kuvissa toisin sanotaankin. Suunnittelijalla ja rakentajalla tulisi olla hyvä yhteys keskenään, jotta epäselvissä tilanteissa on helppoa ottaa yhteys ja kysyä.

Tämän työn heittojousikuljetinta suunniteltaessa päämateriaali on ollut 3 mm paksu ruostumaton teräslevy. Kaikki 3 mm paksusta ruostumattomasta teräslevystä leikatut osat on koottu yhteen 2D-muotoiseen (DXF)-tiedostoon, joten se on ollut helppo antaa syötteenä automaattiselle laserleikkurille. Laserleikkurille esimerkiksi porausten tekeminen on pieni vaiva. Käsityönä tehtynä reikien kohdistamiseen ja porausten tekeminen voi olla todella aikaa vievää.

Laserleikkurilta saadut osat ovat yhdessä tasossa, joten vaaditaan vielä kanttauksia, hi-tauksia ja monia muita eri työvaiheita ennen kuin suunniteltu kappale näyttää halutulta. Eri työstötapojen tunteminen ja niiden mahdollistamat muodot suunnittelijan on hyvä

tuntee, koska 3D-piirto-ohjelmalla on mahdollista piirtää rakenteita, joiden rakentaminen on mahdotonta tai hyvin kallista ja vaikeaa. Hyvin yksinkertainen esimerkki tästä on mahdollisen kanttaussäteen pituus ja kahden peräkkäisen kanttauksen etäisyydet toisistaan.

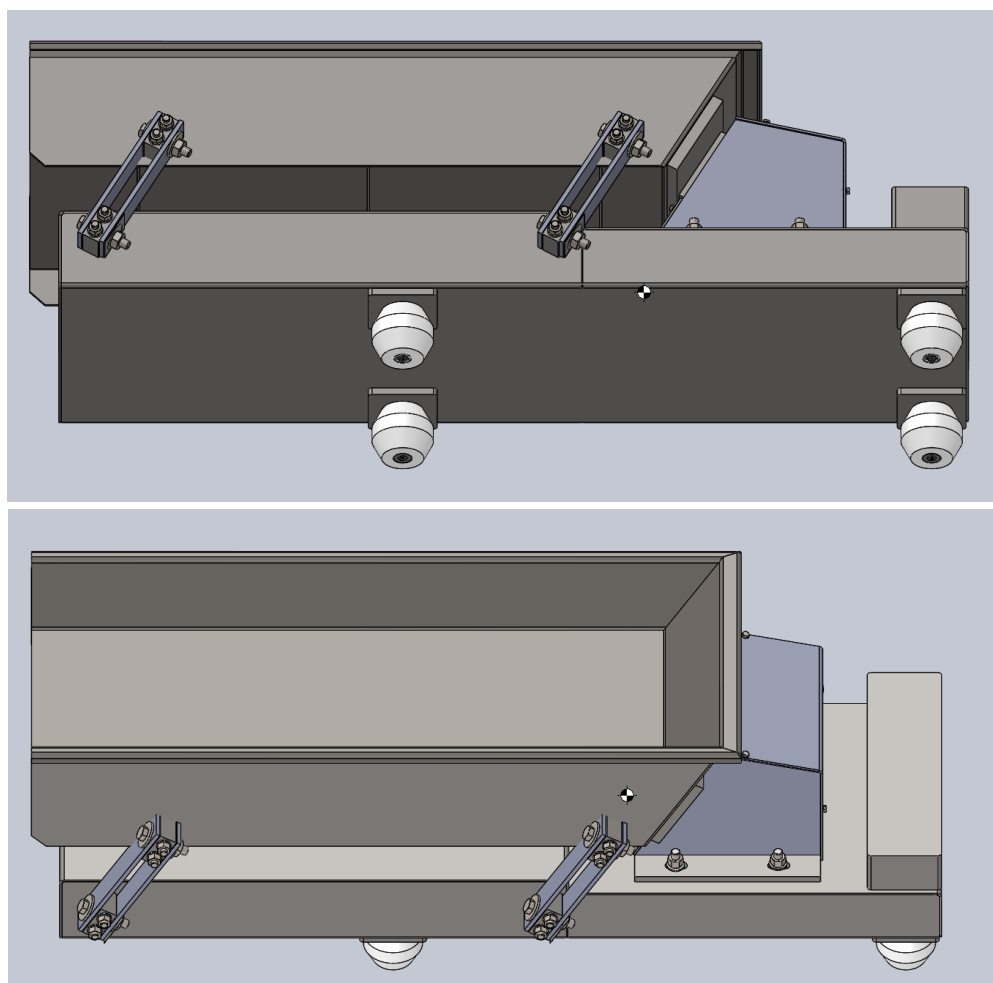


Kuva 19. Magneettipedin pohjan osakuva

Kuvassa 19 esitelty magneettipedin pohjan osakuva ja rakentamiseen vaaditut mitat. Yksinkertaisuuteen on syytä pyrkiä. Kuvassa esitellyillä mitoilla on mahdollista rakentaa toivotun kaltainen magneettipeti. Tässä työssä näitä mittoja ei kuitenkaan tarvittu, koska tämäkin osa leikattiin laserilla muotoonsa 10 mm vahvasta teräslevystä. Kaikista kappaleista on hyvä piirtää osakuvat ihmisille ymmärrettävään muotoon, jotta mittoja voidaan tarkistaa vielä rakennusvaiheessa.

3.3 Rakenteiden ja kokoonpanon suunnittelu

Rakenteet ja kokonaisuudet koostuvat osista. Onnistuneen kokonaisuuden saavuttamiseksi täytyy kaikkien osien olla onnistuneesti suunniteltuja. Joidenkin osien onnistuminen on kriittisempää kuin toisten ja tämä on syytä huomioida jo suunnitteluvaiheessa. Tästä esimerkkinä on suositeltu 3 mm nominaalinen ilmaväli magneetin ja ieksen välillä. Ies on kiinni kourun perässä ja kouru lepää jousien varassa. Jouset ovat toisesta päästään kiinni samassa rungossa, jonka päälle magneettikin on pultattu. Magneettipetiä voi onneksi liikutella eteen- ja taaksepäin vielä käyttöönottovaiheessakin, koska sen kiinnitysporauksiin on jätetty säätövaraa.



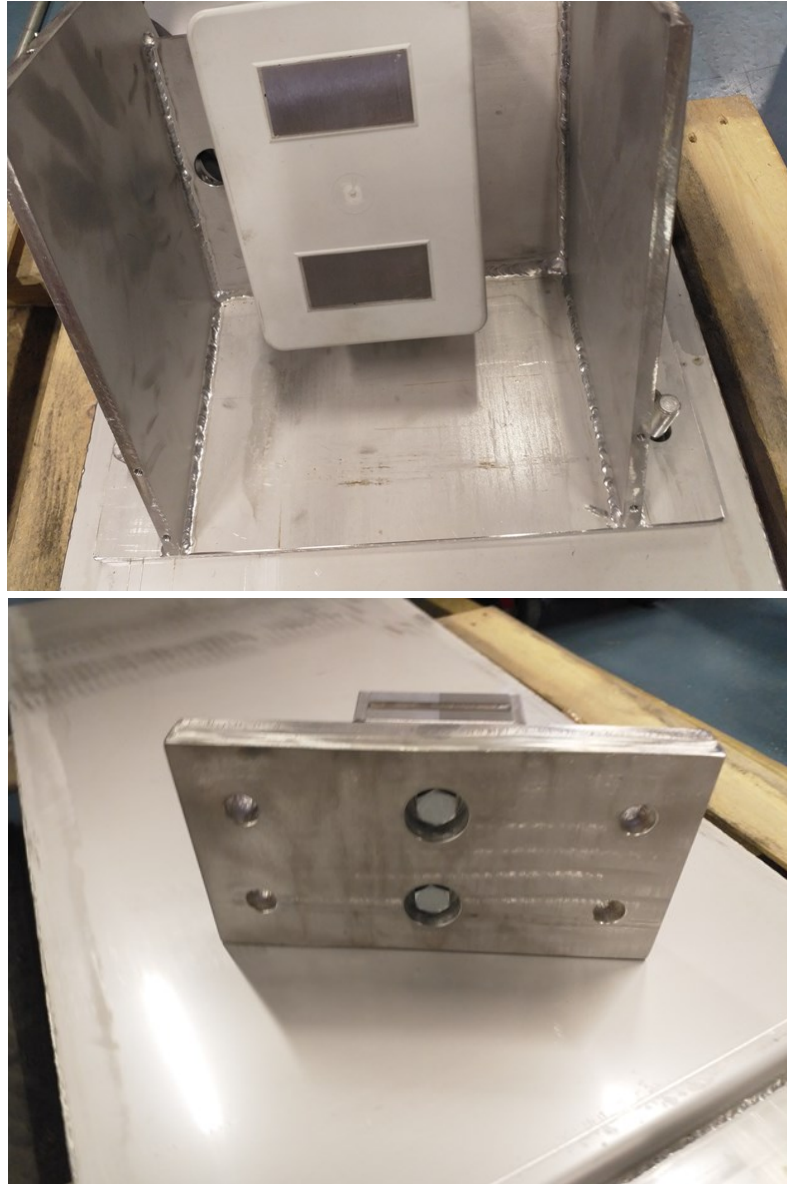
Kuva 20. Rakennekuva heittojousikuljettimesta Solidworksin ruudunkaappauksena

Kuvasta 20 voidaan hahmottaa heittojousikuljettimen kokonaiskuva massakeskipisteineen. Pituutta tällä laitteella on noin 1200 mm, leveyttä noin 400 mm ja korkeutta noin 370 mm. Kokonaisuus painaa noin 170 kg. Nostokorvien paikkaa ei tässä kuvassa ole näkyvissä, mutta niiden paikaksi on suunniteltu kuljettimen takaosaan kaksi kappaletta M10 kierreareikää, joihin nostokorvan saa tarvittaessa kiinnitettyä. Kuljettimen muodosta johtuen ei etupäässä ole nostokorville merkittävää paikkaa, vaan etupää tulee nostaa nostoliinaa apuna käyttäen.

4. HEITTOJOUSIKULJETTIMEN RAKENNUTTAMINEN JA ASENTAMINEN

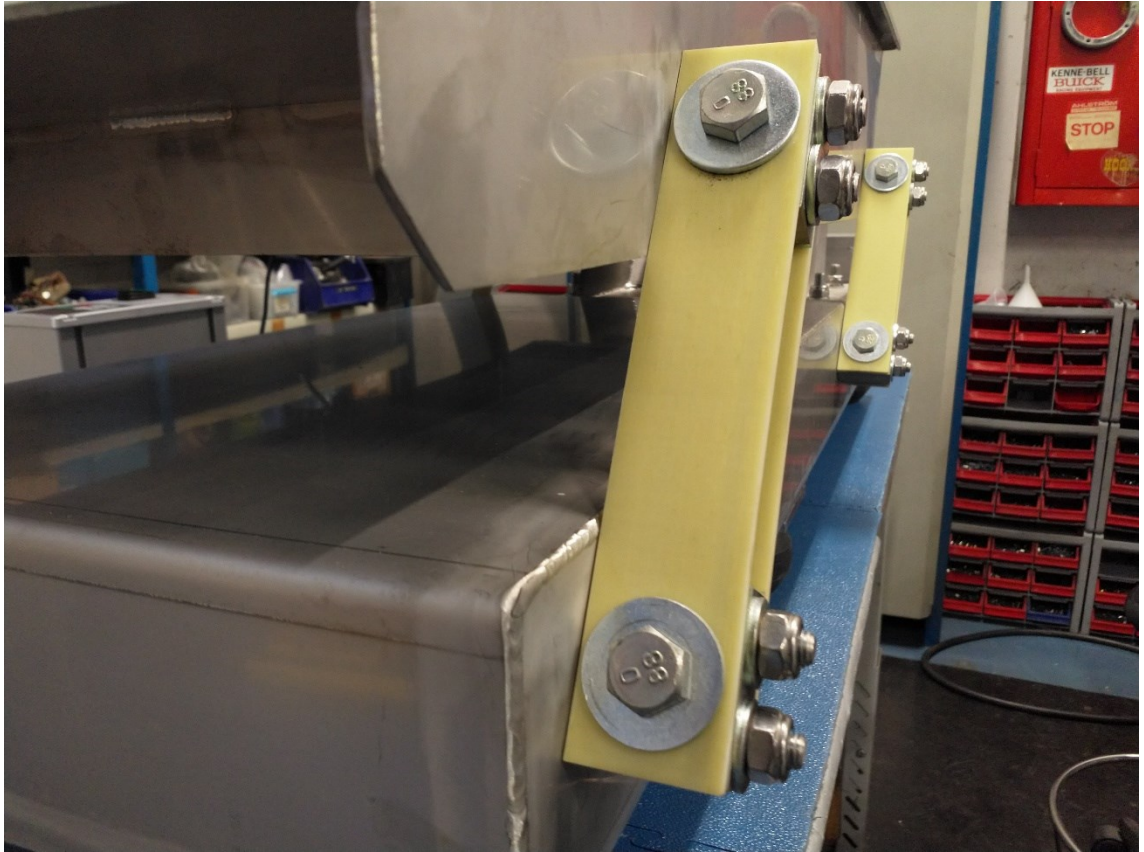
Rakennesuunnittelu onnistui hienosti ja pienistä epäkohdista saatiin arvokasta tietoa tulevaisuudessa rakennettavia kuljetinprojekteja varten. Suunnittelijan olenkin erittäin tyytyväinen näihin sattuneisiin epätäydellisyyksiin. Epäonnistumisista voidaan oppia, eikä samoja virheitä tarvitse toistaa todellisissa asiakasprojekteissa. Tässä työssä rakennetusta kuljettimesta on nyt jo saatu suuremman kokoluokan tilaus, joten saadut opit tulevat arvokkaaseen käyttöön heti alkuvuodesta. Työskentelytapojen kuuluu kehittää jatkuvasti ja osa uuden oppimista on havaita epäkohtia ja korjata niitä.

Osa tämän työn tekemisessä havaituista kehityskohdista liittyivät piirustusohjelman toimintaan, osa rakenteellisiin ominaisuuksiin ja pieni osa myös ihmisten väliseen tiedonvaihtoon. Kaikki edellä mainitut osa-alueet vaativat harjoittelua, jotta voi kokea olevansa alansa ns. rautainen ammattilainen.



Kuva 21. Magneetin ja ieksen kiinnitykset pystysuorassa

Suunnittelussa tapahtui ajatusvirhe magneetin ja ieksen asemoinnissa 3D-malliin, kuten kuvasta 21 voidaan havaita. Magneetin olisi kuulunut olla vaakasuorassa kouruun nähden, mutta suunnittelija piirsi sen pystysuoraan. Todellinen syy ajatusvirheeseen löytyy vanhan 3D-mallin hyödyntämisestä uuden piirretyn magneetin pohjana. Aikaisempi magneetti oli kooltaan suurempi ja siinä oli neljä kiinnityspultin reikää. Uutta pienempää magneettia piirtäessä vanhan magneetin mallista poistettiin kaksi sen kiinnitysreikää ja oletettiin magneetin asettuvan oikeaan asentoon. Näin ei kuitenkaan käynyt. Vahinko oli mahdollista korjata suhteellisen pienellä osien työstöllä. Todennäköistä on, että magneetti olisi toiminut pystyasentoonkin kiinnitettynä.



Kuva 22. Jousenkannatin on kiinni kuljettimen rungossa

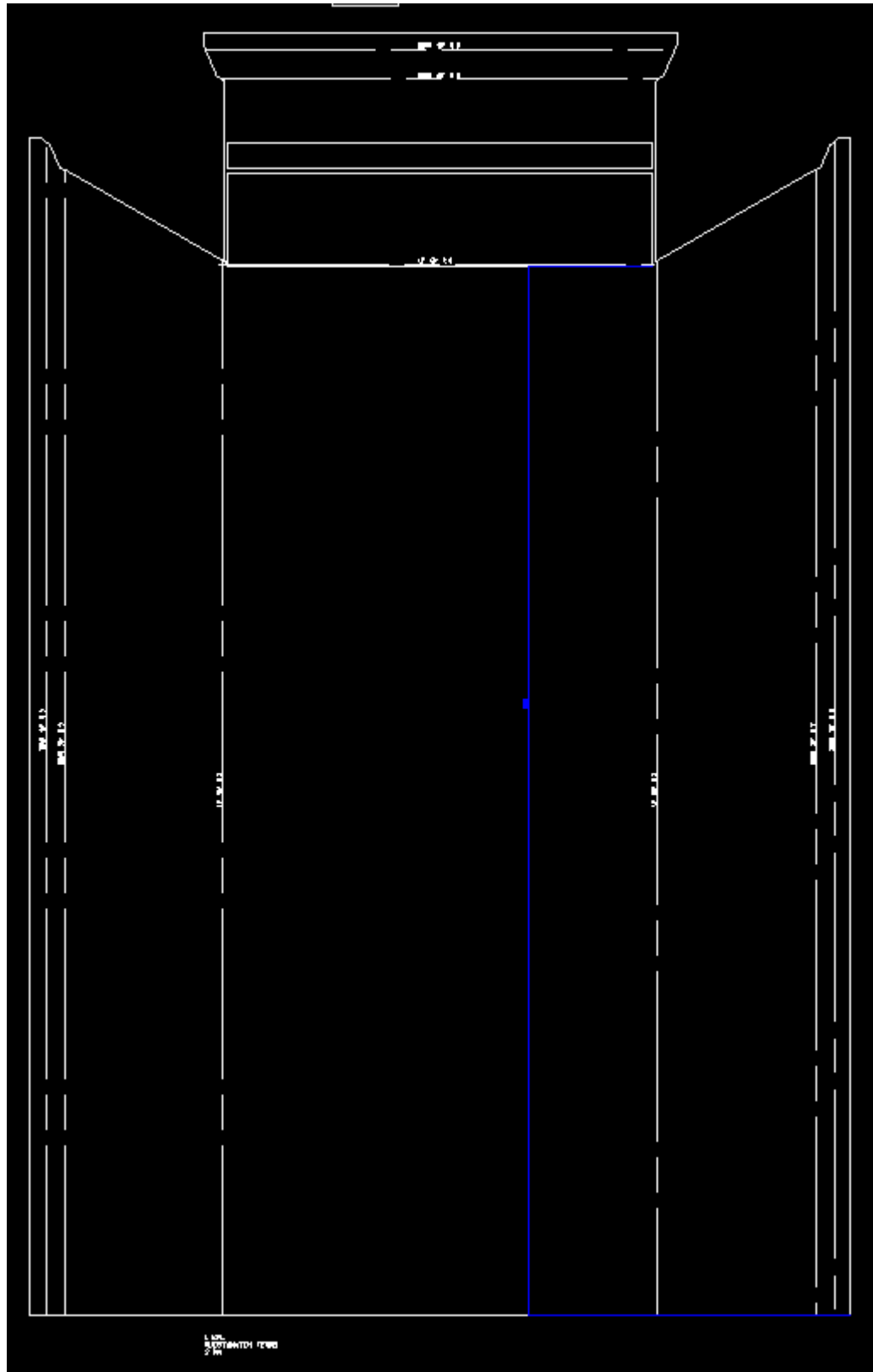
Kuvasta 22 nähdään kuinka jouset ovat kyljestään kiinni kuljettimen rungossa. Osa energiasta kuluu jousen ja kuljettimen väliseen kitkaan. Ongelma oli aikaisemmin tiedostettu, mutta jostakin syystä tieto ei koskaan välittynyt suunnitteluun asti. Ongelma on suhteellisen helposti korjattavissa sillä, että jouset kiinnittävän pultin porausta siirretään hieman kauemmaksi kourun seinämästä.



Kuva 23. *Magneetin ja ieksen virheellinen asemointi*

Kuvasta 23 nähdään toistaiseksi selittämättömäksi jäänyt virhe magneetin ja ieksen välisessä asemoinnissa. Kappaleiden tulisi olla toisiinsa suhteessa kohdakkain, jotta magneetin tuottama vetovoima välittyisi iekseen optimaalisesti. Uusintakoneistuksesta huolimatta magneetti ja ies ovat erillään toisistaan pystysuunnassa. Tämänkin voi vielä korjata tekemällä uudet poraukset magneettipetiin alemmalle tasolle. Mahdollisia syitä virheelliseen asemointiin voivat olla väärin piirretty malli, rakennusvaiheessa tapahtunut väärinymmärrys tai 3D-mallin versionhallinnassa tapahtunut konflikti.

Liitteessä 1 ja 3 on esitelty magneetin vertikaaliseen, eli pystyasentoon suunnitellut kiinnitysreiät. Liitteissä 2 ja 4 reikien paikat on korjattu horisontaaliseen asentoon. Liitteen 4 reikäpaikkoja olisi pitänyt laskea entisestään, jotta magneetti olisi asettunut sille kuuluvalla tasolle.



kaidetta, jotka olivat yllättäen projisoituneet 3D-mallista tasokuvia Solidworksillä piirrettäessä. Syytä projisoitumiseen ei vieläkään tiedetä, mutta niiden seurauksena päätylevy piti rakentaa uudestaan. Tähän ominaisuuteen on syytä kiinnittää huomiota jatkossa DXF-tasokuvia luotaessa.



Kuva 25. *Päätöseinämaan projisoituneet reiät*

Kuvan 25 päätöseinämä aiheutti ylimääräistä työtä metallintyöstössä, koska päätöseinämä täytyi leikata pois ja tehdä uusi metallilevy päätöseinämäksi. Heittojousikuljettimen rakentamista varten on piirretty kokoonpanokuvat perinteisessä pdf-muodossa (liitteet 5-8) sekä mittojen tarkistamista varten DXF-muotoinen kokonaiskuva, josta kokonaisuuden mittoja oli mahdollista tarkistaa työstövaiheessa. Hieman DXF-muotoisen kokonaiskuvaa muistuttava kuva löytyy liitteestä 9.

Edellä mainituista ongelmakohdista huolimatta projektin työn tuloksena valmistui erittäin hyvin toimiva kuljetin, joka tarjoaa erinomaisen työkalun kokeilla ja varmistaa erilaisten ainesten kuljetusmahdollisuuksia vaihtelevilla kiihtyvyyksillä ja heittoamplitudeilla. Valmis kuljetinkokonaisuus on nähtävillä liitteessä 10.

5. HEITTOJOUSIKULJETTIMEN OHJAUS

Heittojousikuljettimen säätöparametreja on useita ja niistä voi kukin suunnittelija kasata itselleen mieluisen kokonaisuuden. Tässäkin pätee monesta muusta yhteydestä tuttu lausahdus: ”kaikki vaikuttaa kaikkeen”. Merkittävin yksittäinen säätöparametri on haluttu toimintataajuus, jonka säätömarginaleihin vaikuttavat valitut jouset ja magneetti. Kaiken onnistuessa rakenteiden suunnittelussa ja kokoonpanossa magneetin toiminta-alueelta löytyy rakenteiden resonanssitaajuutta vastaava värähtelytaajuus. Järjestelmän toimintataajuutta voidaan säätää muokkaamalla jousia, kuten esimerkiksi kitaraa viritettäessä. Paksulla ja pitkällä jousella on matala ominaistajuus. Vastaavasti lyhyellä ja ohuella jousella on korkea ominaistajuus. Jousen mekaaninen jyrsiminen ja muokkaus ovat hitaita, työläitä ja vaikeita säätötapoja, joten helpommaksi vaihtoehdoksi on osoittautunut taajuussäätimen käyttö.



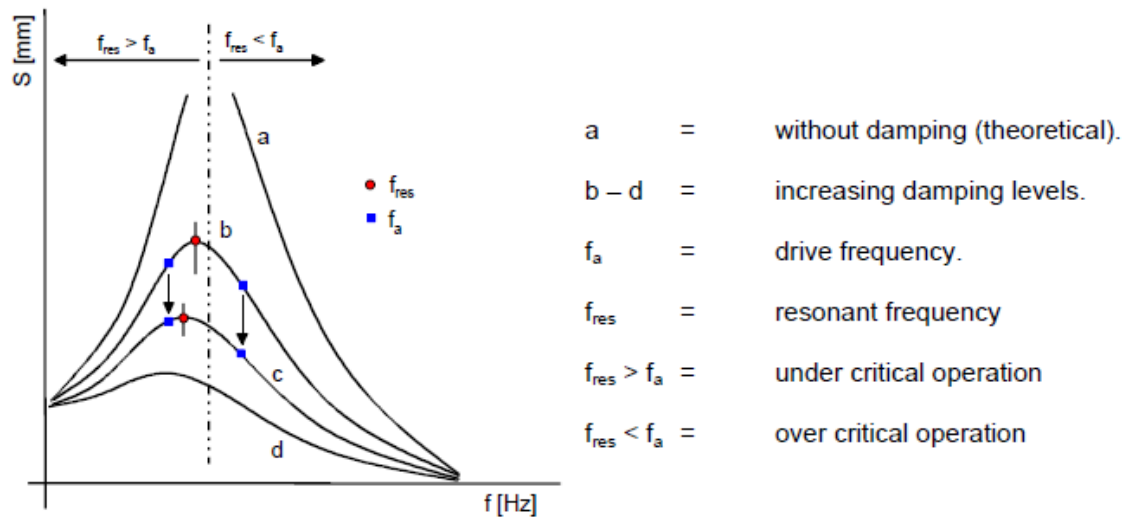
Kuva 26. Heittojousikuljettimen mittausjärjestelyt

Kuvasta 26 nähdään kuljettimen magneettia ohjaava ja säätävä Reovib MFS 268 –säädin. Säätimestä löytyy hyvin kattavat säätömahdollisuudet ja väyläliitännät. Säätimen avulla on mahdollista asettaa ja säätää taajuutta 5–300 Hz välillä, jännitettä 0–205 V väliltä ja virtaa 0–6 A välillä, asettaa käynnistys ja sammutusramppeja, asettaa haluttu heittoamp-

litudi, sekä etä-hallita magneetin toimintaa yms. Tässä työssä kaikkia säätimen ominaisuuksia ei hyödynnetty. Esimerkiksi säätimen ulkoinen takaisinkytkentä jäi hyödyntämättä. Mittauksia kuitenkin tehtiin Reo SWM 400 kannettavalla kiihtyvyyssanturi–mittari yhdistelmällä, joka näkyy kuvassa 24 sinisenä kämmenen kokoisena päätelaitteena. Lisäksi kuvassa näkyy rakotulkki ja 4 mm paksuinen heittokuljettimen jousi, joiden avulla magneetin ja ieksen välinen ilmarako saatiin mitattua. Kuljettimen käyttämää virtaa ei taulukoitu säännöllisesti, mikä olisi ollut järkevää tulosten tarkisteluun fysikaalisen tarkastelun kannalta. Käytettyä virta-arvoa tarkasteltiin satunnaisesti esimerkiksi suurilla ilma-raoilla ja tultiin siihen tulokseen, että magneetin ottama virta on turvallisesti sallittujen virtarajojen sisäpuolella. Magneetin ottama virta on pienimmillään kuljettimen käydessä resonanssitaajuudellaan. Tällöin epätarkka virta-arvo oli noin 20 % luokkaa säätimen tarjoamasta maksimivirrasta (6 A), joka vastaa 1,2 A virtaa. Käytetyn magneetin suurin sallittu nominaalinen virrankesto on 3,7 A.

5.1 Taajuussäädin

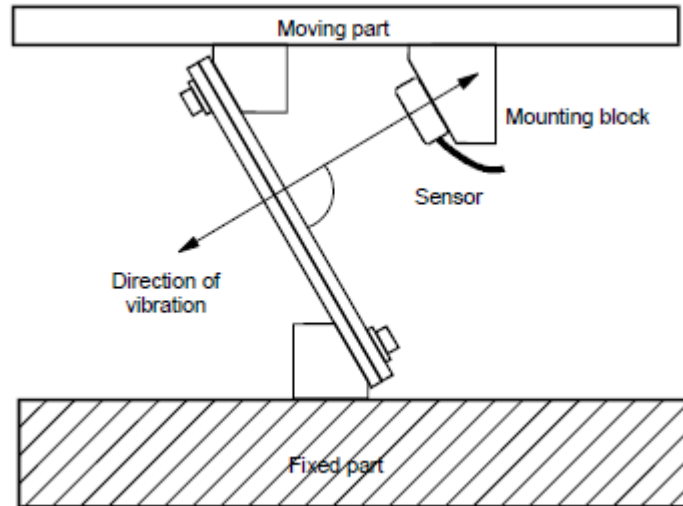
Heittojousikuljetin voidaan suunnitella toimimaan energiatehokkaana kuljettimena, joka toimii resonanssitaajuudellaan tai hyvin lähellä sitä. Yleisimmin heittojousikuljetin viritetään toimimaan ns. alikriittiselle toiminta-alueelle. Tällöin etuna on se, että kuorman kasvaessa toimintapiste siirtyy lähemmäs resonanssitaajuutta ja näin ollen kuljetin toimii entistä pienemmällä vaaditulla energialla. Kuorman eli vaimennuksen kasvaessa niin paljon, että resonanssitaajuus ylittyy, siirrytään ylikriittiselle puolelle. Ylikriittisellä puolella toimittaessa lisääntyvä kuorma pyrkii pysäyttämään värähtelyn. Magneetilta vaaditun energian määrä kasvaa sitä mukaa, mitä kauemmaksi toimintapiste siirtyy resonanssitaajuudesta.



Kuva 27. Resonanssivärähtelijän ali- ja ylikriittiset toiminta-alueet [9]

Kuvassa 27 on havainnollistettu resonanssitaajuuden vaikutukset heiton pituuteen eri vaimennusmäärillä eli kuormilla. Suuria määriä kuljettavilla heittojousikuljettimilla on usein tärkeää päästä mahdollisimman hyvään hyötysuhteeseen, vaikka virtauksien säädettävyyttä ei olisikaan kovin tarkkaa. Alikriittiselle toiminta-alueelle säädetyllä heittojousikuljettimella olisi hyvä varmistua siitä, että kuljetin ei siirry iskukäytölle, vaikka heittoamplitudi kasvaisikin siirryttäessä kohti resonanssitaajuutta. Iskukäytöllä tarkoitetaan sitä, että magneetti ja sen ies hakkaavat toisiaan vasten. Ilmaväli tulee jättää riittävän suureksi, jotta iskukäyttö ei pääse tapahtumaan.

Tarkkoihin annostelutehtäviin suunnitelluilla laitteilla voi olla järkevää toimia ylikriittisellä toiminta-alueella, koska siellä taajuusvasteen ja heittopituuden välinen yhteys on lineaarisempi. Haittapuolena tässä on huonompi hyötysuhde. Ylikriittistä toiminta-aluetta voidaan hyödyntää myös tilanteissa, joissa kuljetettava aines tarrautuu kiinni kuljettimen pohjaan. Värähtelytaajuuden nostaminen voi auttaa ainesta irtoamasta seinämästä.



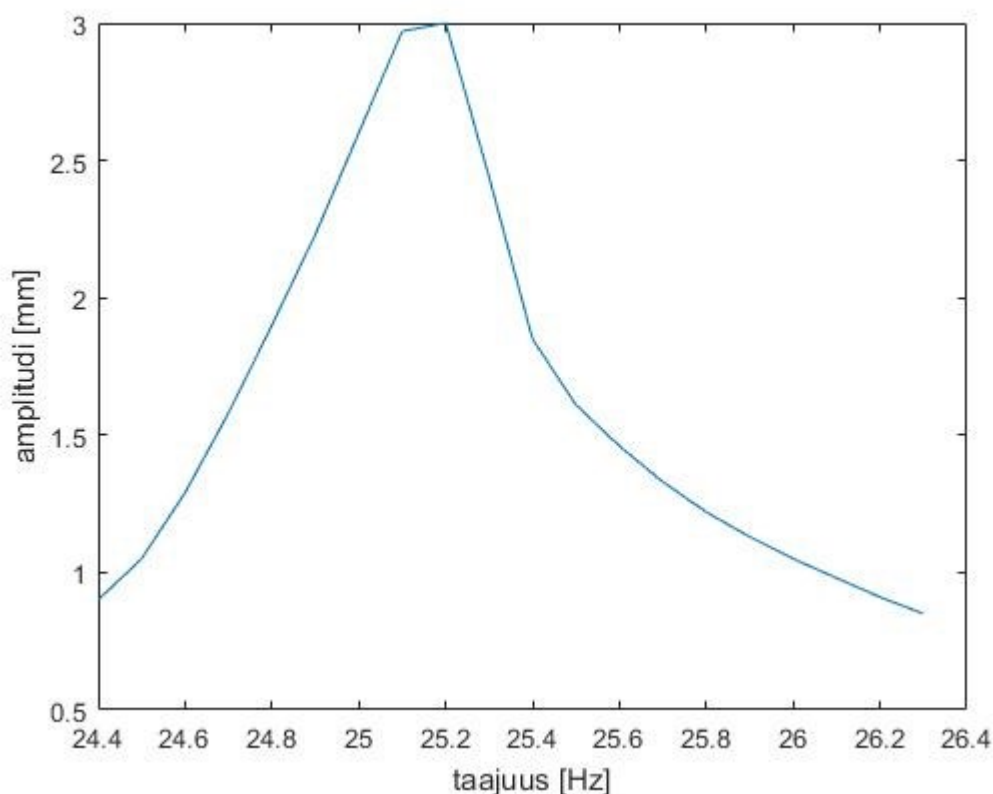
Kuva 28. Taajuussäätimen takaisinkytkentä [9]

Kuvassa 28 taajuussäädin tarjoaa myös mahdollisuuden takaisinkytkennän hyödyntämiseen, jolloin voidaan pysyä jatkuvasti halutulla taajuudella kuormanvaihteluista riippumatta. Säädin kykenee kuormanvaihteluista riippumatta tarjoamaan kuljettimelle oikeanlaista jännitettä, virtaa ja taajuutta. Oikein käytettynä taajuussäädin tarjoaa paljon mahdollisuuksia käyttäjälleen. Tehdasympäristöissä kuljettimet toimivat usein osana isompaa ohjauslogiikkaa ja säätimen avulla heittojousikuljetin on mahdollista integroida sujuvasti osaksi isompaa prosessikokonaisuutta. [9]

5.2 Mittaustulokset

Heittojousikuljettimesta on mahdollista suorittaa suuri määrä erilaisia mittauksia liittyen ilmvälän vaihteluihin, jännitteen -ja virran muutoksiin, taajuuden vaihteluihin, jousien jäykkyyksiin, heittokulmien vaihteluihin jne. Kaikista mahdollisista mitatuista suureista vain pieni osa on esitelty tämän työn tuloksina, koska kaikkia oivalluksia on vaikea pukea kaavioiksi tai mittausdataksi. Kuljettimen toiminta on kokonaisuus, jossa yksittäisten fyysikaalisten suureiden mittaaminen ja kaaviomuotoon tulostaminen ei aina tuo lisäarvoa kuljettimen rakennuksen kannalta. Seuraavassa kuitenkin pieni esittely mitatuista fyysikaalisista suureista kaavioina.

Mittaukset tehtiin käyttäen Reovibin aiemmin esiteltyjä laitteistoja. Saatu data kirjattiin taulukkolaskentaohjelmaan (Excel) ja muotoiltiin taulukoksi tai siirrettiin Matlab-ohjelmaan. Matlabissa saatua dataa muokattiin ohjelmalle kelpaavaan muotoon, kuten korvattiin desimaalierottimena toimineet pilkut pisteillä ja laitettiin mittausarvojen välille puolipisteet erottimiksi. Tämän jälkeen data-aines tulostettiin kuvaajamuotoon plot-komennoilla.

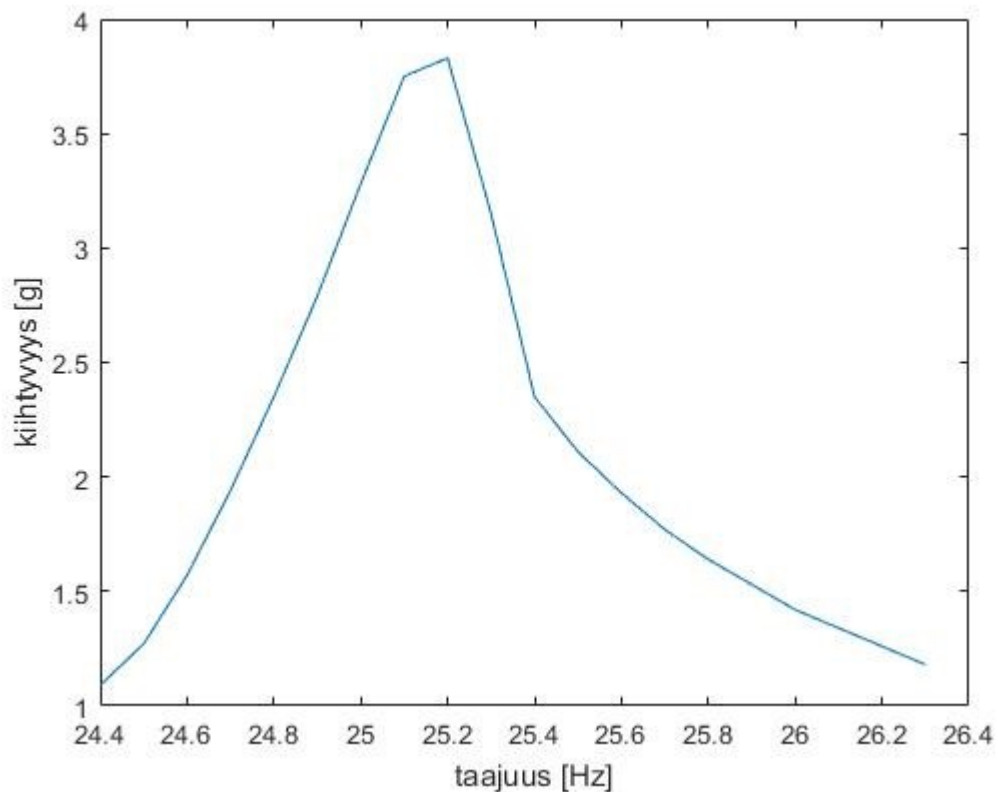


Kuva 29. Heittojousikuljettimen heittopituus värähtelytaajuuden funktiona

Kuvassa 29 on esitelty kuljettimen heittoamplitudin vaihtelu värähtelytaajuuden funktiona. Kuvaajasta nähdään selvästi aiempaa teoriaosuutta vastaava käyrämuoto. Resonanssipiste löytyy noin 25,2 Hz taajuudelta, jolloin heittoamplitudi on 3 mm luokkaa. 3

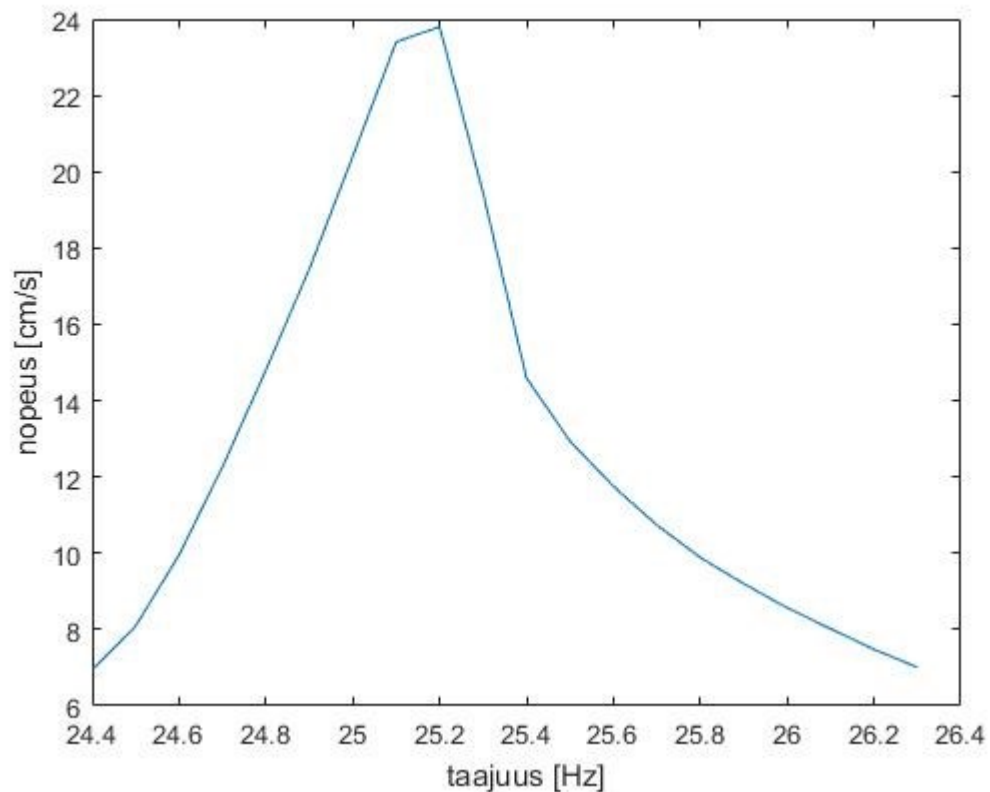
mm jousen taipuma on hyvin turvallisesti jousivalmistajan määrittämien maksimitaipumien alapuolella. Valittujen jousien suurin jatkuvassa käytössä sallittu taipuma on 7 mm, joten kuljetin tarjoaa jatkossakin vielä suuren säätöreservin.

Tässä työssä kiihtyvyysanturia tai muuta ulkoista takaisinkytkentää ei hyödynnetty, koska kuljettimeen ei kohdistunut dynaamisia kuormia. Mittaukset tehtiin joko tyhjällä kuljettimella tai suhteellisen kevyellä kuormalla kuljettimen päällä. Mittauksissa kuormasta aiheutuvan kuljettimen vaimenema voidaan katsoa olevan olematon.



Kuva 30. Heittojousikuljettimen kiihtyvyys värähtelytaajuuden funktiona

Kuvasta 30 nähdään heittojousikuljettimen kiihtyvyyden vaste värähtelytaajuuden muutoksiin. Kuvaajan muoto on hyvin samankaltainen amplitudivaihteluiden kanssa. Aiemmin havaitun mukaan kuljettimella on mahdollista kasvattaa kiihtyvyyksiä, amplitudia ja sitä myöten myös kuljetusnopeutta. Heittovoiman kasvattaminen ei kuitenkaan aina lisää kuljetusnopeutta, vaan oikeat säädöt tulee hakea tapauskohtaisesti. Kappaleessa 3.4 esitellyn teorian mukaan kitkakertoimen ollessa 0,35 ja heittokulman ollessa 30° saavutetaan suurin kuljetusnopeus heittoluvulla 3,0. Heittolukua 3,0 vastaava taajuus löytyy työn kuljettimesta noin 25 Hz taajuusalueelta. Tällöin kuljetusnopeuden tulisi olla $0,12 \text{ m/s} = 12 \text{ cm/s}$.



Kuva 31. Heittojousikuljettimen laskennallinen kuljetusnopeus värähtelytaajuuden funktiona

Kuvassa 31 nähdään kuljettimen Reo SW 400–mittarin ilmoittama laskennallinen kuljetusnopeus taajuuden funktiona. Kuljetusnopeutta ei voi kuitenkaan ilmoittaa näin universaalisti, koska kuljetusnopeuteen vaikuttavat muun muassa kuljettimen pinnan materiaali, kuljetettavan materiaalin muoto ja pintojen välinen kitkakerroin. Aiemmin laskettu 12 cm/s kuljetusnopeus ei toteudu 25 Hz taajuudella, mutta toisaalta kitkakerroin on tuntematon, mikä osoittaa hyvin kuinka vaikeaa kuljetusnopeutta on ennustaa.

Kuljetinta testattiin muun muassa yksittäisillä sylinterimäisillä lakritsimakeisilla, paperikääreissä olevilla lakritseilla ja työhansikkailla. Sylinterimäiset makeiset saattoivat lähteä kierimään vastavirtaan. Paperikääreissä olevien makeisten kuljetusnopeudessa oli hajontaa toistokokeissa saatujen mittausten perusteella.

Mittaukset poikkeavat kuitenkin todellisuudesta paljonkin, koska oikeissa käyttötilanteissa kuljetettavaa ainesta on paljon. Kuljetusaineksen määrän kasvaessa syntyy niin sanottu jonopaine, joka edesauttaa kuljetusta. Tämä oli havaittavissa jo kourallisella makeisia verrattuna yksittäisen makeisen kuljetusnopeuteen. Toistaiseksi varmistamaton oletus on, että suuremmilla kuormamäärillä kuljettimen resonanssitaajuus muuttuu kuorman mukaan siten, että resonanssitaajuudella kuljetettava aines ei niin sanotusti törmää kuljettimen pintaan. Näin ollen kuljetettavaan ainekseen ei kohdistuisi suuria vahingoittavia impulsseja, vaan kulkeutuminen olisi sujuvaa.

Kuljetusnopeuden teoreettinen ennustaminen on vaikeaa johtuen suuresta määrästä muuttujia ja tarvittujen parametrien monimutkaisuudesta. Käytännössä paras tapa varmistua aineksen sopivuudesta heittokuljetettavaksi on tehdä sopiva testijärjestely aineen kuljetettavuuden testaamiseksi. Kuljetin, joka on kehitetty tämän työn tuloksena, soveltuu kuljetettavien aineiden testaamiseen mainiosti.

5.3 Jousien säätäminen

Jousia säätämällä voidaan korjata järjestelmän resonanssitaajuutta. Heittokulmankin säätäminen voi olla mahdollista myös jälkikäteen riippuen suunnitellusta rakenteesta. Heittokulmaa säätämällä voidaan vaikuttaa kuljetusnopeuteen ja vähentää kuljetettavan aineksen tarrautumista kuljettimen pintaan. Optimaalinen heittokulma vaihtelee kuljetettavan aineksen mukaan.

Yleissääntönä voidaan pitää, että pienemmän kitkakertoimen omaava aines vaatii suuremman heittokulman ja suurempi kitkakerroin vaatii pienemmän kulman. Tässä työssä jousia ei säädetty, koska taajuussäädin ja ilmavälin säätäminen olivat huomattavasti helpompia vaihtoehtoja. Heittokulman säätämiseen ei ollut edes rakenteellisia mahdollisuuksia.

5.4 Ilmavälin säätäminen

Magneetin ja ieksen välisen ilmavälin ja kuljettimen käynnistämiseen vaaditun tehon välinen yhteys oli yksi merkittävimpiä selvityskohtia tämän diplomityön teettäjän kannalta. Magneettipiirien teorian pohjalta oli tiedossa, että ilmavälin kasvattaminen tulee lisäämään tehon tarvetta merkittävästi. Tarkkaa tietoa mahdollisesta maksimi-ilmavälistä kullekin magneetille ei ollut kuitenkaan saatavissa laitevalmistajien toimesta. Laitevalmistaja ilmoittaa ns. luokitellun ilmavälin, jolla laite on suunniteltu toimimaan. Tässä tapauksessa magneetin lopullinen luokiteltu ilmaväli oli 4,5 mm. Tämän lisäksi ilmoitetaan maksimivirrankesto (3,7 A), taajuus (30 Hz) ja jännite (200 V). Teholla tarkoitetaan virran ja jännitteen tuloon. Tämän työn mittauksissa virtaa ei kuitenkaan taulukoitu säännöllisesti, joten laitteen tehosta puhuminen on fysikaalisesti hieman epäkorrekti ilmaus.

Valmistajan itsensä ilmoittamissa arvoissa on kuitenkin vaihtelua eri lähteistä riippuen. Koneensuunnittelijan kannalta inspiroivaa on päästä rakentamaan laite, joka on mahdollisimman monikäyttöinen ja samalla energiatehokas.

Taulukko 4. *Mittauksia eri ilmaväleillä*

Suure	M1	M2	M3	M4
säätimeltä				
Ilmaväli [mm]	8,0	3,5	4,5	4,5
Jännite [%]	39,9	27,9	36,5	30
Taajuus [Hz]	25,5	25,5	29,5	25,5
anturilta				
Kiihtyvyys [g]	5,35	5,49	5,39	5,37
Nopeus [cm/s]	33	33,8	34,3	32,7
Amplitudi [mm]	4,2	4,19	4,46	4,09

Taulukkoon 4 on koottu mittauksia kuljettimen toiminnasta eri ilmaväleillä. Tavoitteena mittauksissa on ollut pitää kiihtyvyys lähellä arvoa 5,4 g ilmavälin kasvaessa. Taulukossa esiintyvä jännitteen prosenttiarvo kertoo käytetyn jännitteen prosenttiarvon käytössä olleesta 230 VAC tehollisarvosta. Esimerkiksi mittauksessa M4 saatu 30% jännite vastaa 69 VAC jännitettä. Magneetin kestävä suurin jännitteen tehollisarvo on 200 VAC, joten säätövaraa on riittävästi.

Oletuksena oli, että ilmavälin kasvattaminen tulee nostamaan vaaditun tehon määrää. Jännitteen ja taulukossa näkymättömän virran kulutuksen nousu olivat kuitenkin yllätyksellisen pienet. Magneettipiirien teorian perusteella oletus oli, että ilmaväleissä syntyvä tehohäviö on erittäin merkittävä. Oletin tehohäviön suuremmaksi myös siitä syystä, että magneetti ja ies eivät olleet kohdakkain, joten hajavuon määrä on ideaalitulannetta merkittävästi suurempi.

Työn yksi keskeisimpiä tavoitteita oli saada varmistus oletukselle, että magneettivalmistajan ilmoittama luokiteltu ilmaväli voidaan ylittää. Tavoitteena oli luoda laite, jolla päästään pidempään heittoamplitudiin. Tämän toteutuksessa onnistuttiin ja vastaisuudessa on mahdollista suunnitella ja toteuttaa kuljettimia, joissa pitkistä heittopituudesta on hyötyä.

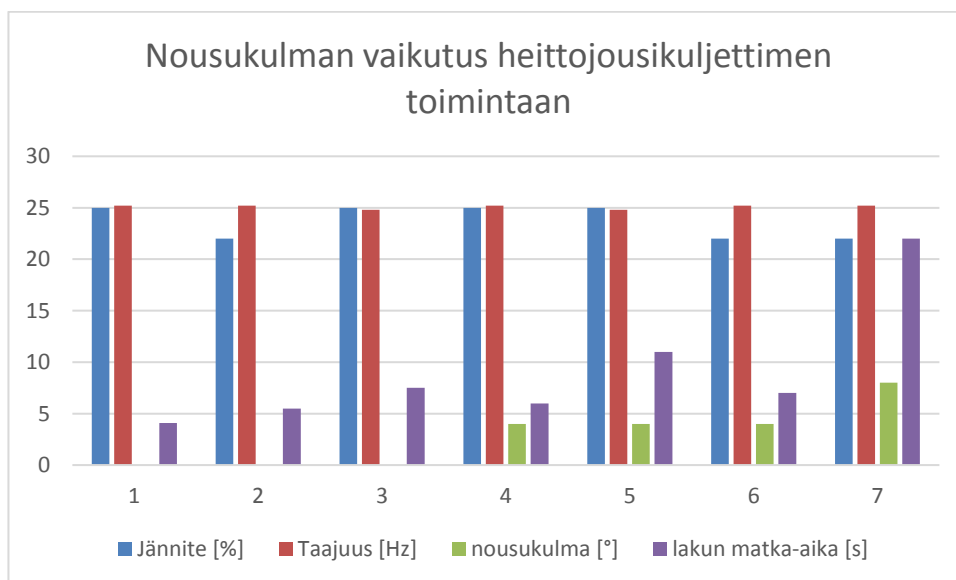
5.5 Nousukulman säätäminen

Tärykuljettimia esiteltäessä usein esitetään kysymys, että voidaanko tavaravirtaa kuljettaa ylämäkeen. Aikaisempien tärykuljetinprojektien pohjalta tiedettiin nousukulman olevan mahdollinen. Heittojousikuljettimien kohdalta oletus oli saman suuntainen, mutta varmuutta asialle ei ollut. Tämän vuoksi oli aiheellista suorittaa koemittauksia.

Taulukko 5. *Nousukulman vaikutus kuljetusparametreihin*

Suure	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
nousukulma [°]	0	0	0	4	4	4	8
Ilmaväli [mm]	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Jännite [%]	25	22	25	25	25	22	22
Taajuus [Hz]	25,2	25,2	24,8	25,2	24,8	25,2	25,2
Kiihtyvyys [g]	5,68	4,05	3,42	5,72	3,48	4,9	4,26
Nopeus [cm/s]	35,2	25	21,5	35,5	21,9	26	26,3
Amplitudi [mm]	4,43	3,17	2,76	4,48	2,81	3,28	3,31
lakun matka-aika [s]	4,1	5,5	7,5	6	11	7	22

Taulukossa 5 on esitelty mittaustuloksia yksittäisen paperikääreissä olevan lakun kuljetusnopeudesta vakioilmavälillä värähtelytaajuuden ja jännitteen vaihdellessa. Taulukossa ilmoitettu kuljetusnopeus on kiihtyvyyssmittarilta saatu laskennallinen arvio. Todellinen kuljetusnopeus ei selvästikään seuraa tuota arvoa, koska mittari ei osaa huomioida nousukulmaa.



Kuva 32. *Nousukulma on merkittävä kuljetusnopeuteen vaikuttava parametri*

Kuvassa 32 on havainnollistettu nousukulman suurin merkitys yksittäisen lakun kuljetusnopeuteen. Käytännössä taulukossa ilmoitetut lakun matka-aika kuljettimen alkupäästä

loppupäähän (noin 70 cm) eivät olleet vakiokestoisia tapahtumia, vaan taulukossa on ilmoitettu keskiarvo usean toiston tuloksista. Nousukulmaa lisättäessä oli havaittavissa, että välillä lakupatukka pääsi ns. liitoon ja se eteni huomattavasti nopeammin kuljettimen pinnalla verrattuna muihin toistomittauksiin, vaikka säätimen parametrit pysyivät täysin samoina. Selvää syytä tälle käyttäytymiselle ei löytynyt.

Vastakkainen ilmiö löytyi nousukulman kasvettua 8° kulmaan. Kulkeutuminen vaikeutui huomattavasti ja välillä yksittäinen lakupatukka ei päässyt ollenkaan mäkeä ylös, vaan jäi pyörimään kuljettimen alkupäähän. Sama testi toistettaessa noin kymmenen lakupatukan suuruisella otoksella, keskimääräinen kuljetusnopeus kasvoi merkittävästi. Tällöinkin yksittäisiä lukuja saattoi jäädä pyörimään kuljettimen alkupäähän. Jonopaineen avulla kuljetinta saattaisi olla mahdollista käyttää näinkin pienen kitkakertoimen omaavan kappaleen kuljettamiseen. Kuljetuskokeessa, jossa käytettiin lakuainesta ilman paperipäällystettä, huomattiin kuljetuksen olevan paljon sujuvampaa paperipäällysteiseen karamelliin verrattuna. Syinä tähän olivat luultavasti lakun ja kuljettimen välinen suurempi kitka ja paperipäällysteen sisään muodostunut ilmatyyny, joka absorboi heittoenergiaa itseensä.

Tässäkään asiassa ei voida antaa yksiselitteistä maksimaalista nousukulmaa, jota heittousikuljettimessa voitaisiin käyttää. Suurin mahdollinen nousukulma riippuu tapauskohtaisesti kappaleen ominaisuuksista ja kuljettimen säädöistä.

6. YHTEENVETO

Diplomityö on tarjonnut haasteita ja vaatinut uusien yliopistossa opettettujen asioiden lisäksi paljon itseopiskelua. Työ on opettanut ja antanut vastauksia ennalta tuntemattomiin ilmiöihin, joita koulua käydessä ei pääse tutustumaan. Hydrauliikan ja automatiikan pääaineen opinnoista on ollut paljon hyötyä ainevirtojen ja säätötekniikan ymmärtämisen kannalta, mutta koneensuunnittelun ja materiaalien sekä rakenteiden tietämystä on tarvinnut kerryttää omin voimin. Koneensuunnittelu vaatii lisää harjoitusta ja hyvien käytänteiden opettelua. Diplomityö koostui viidestä pääosasta, joita ovat heittojousikuljettimen suunnittelu, rakentaminen, laitteen virittäminen ja mittaaminen sekä diplomityön kirjoittaminen. Jokainen edellä mainituista osa-alueista tarjoaa mahdollisuuksia jatkokehitykselle. Heittojousikuljettimen kehitystyö on verrattavissa viulun veistämiseen, täydellistä viritystä on vaikeaa löytää.

Heittojousikuljetin on erinomainen vaihtoehto kuljettamaan ja annostelemaan erilaisia kiinteitä ja kuivia aineita. Kuljetin soveltuu erityisesti elintarvikepuolelle, koska käytetyt rakenteet ja pinnat ovat pestäviä ja likaa keräämättömiä. Kuljetinta voitaisiin käyttää teollisuudessa paljon nykyistä enemmänkin, jos tekniikka olisi paremmin ihmisten tietoisuudessa. Heittojousikuljettimilla voitaisiin korvata useita ruuvi- ja hihnakuljettimia paremmalla hyötysuhteella ja säädettävyydellä. Lisäksi heittojousikuljettimen yhteyteen on mahdollista rakentaa seularakenteita, joiden avulla esimerkiksi karamellien seassa kulkeva ylimääräinen irtosokeri saataisiin seulottua pois.

Heittojousikuljettimia koskeva teoria ja käytäntö antavat hyvin yhdenmukaisia tuloksia. Tästä osoituksena valmistui toimiva ja monipuolisesti säädettävä kuljetin. Pelkkä tehon kasvattaminen ei aina lisää kuljetusnopeutta, vaan kuljetusnopeuteen vaikuttavat tekijät muodostavat toisiinsa liittyvän kokonaisuuden. Työ osoitti, että magneetti voimalähteenä tarjoaa hyvin laajan säätöskalan. Magneetin ja ieksen välistä ilmapäliä on mahdollista kasvattaa merkittävästi, minkä seurauksena on mahdollista rakentaa pitkän heittoamplitudin mahdollistavia kuljettimia jatkossa. Työn yksi keskeisimmistä tavoitteista oli selvittää ilmapälin pidentämisen vaikutuksista magneetin ominaisuuksiin. Pitkä heittoamplitudi on toivottu kuljettimen ominaisuus esimerkiksi salaatinlehtiä kuljetettaessa. Pitkällä heittoamplitudilla kuljettimen pintaan tarrautuva materiaali saadaan todennäköisemmin irti kuljettimen pinnasta.

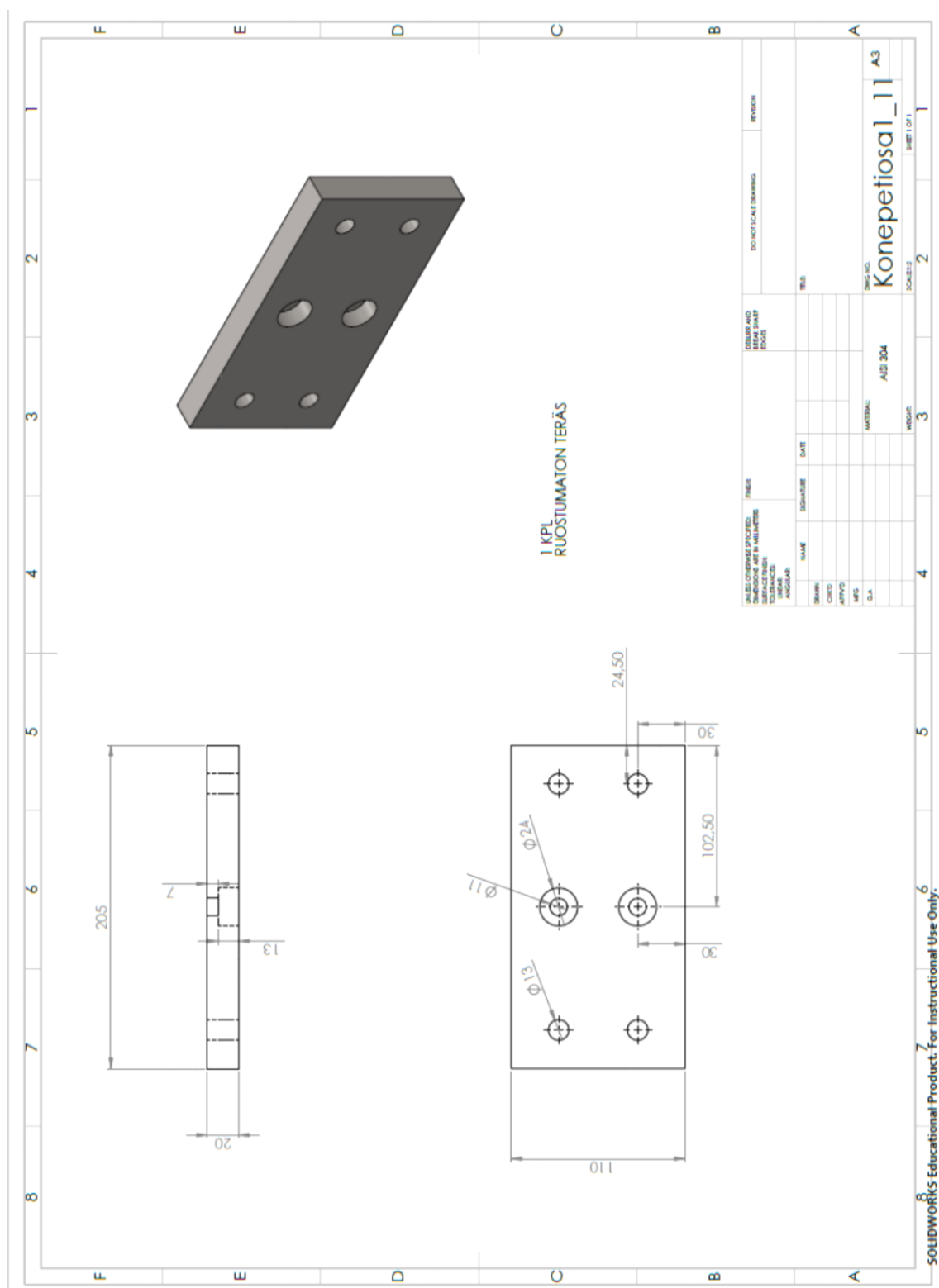
Tulevaisuudessa kuljetinta tullaan testaamaan maksimikuormien alla. Tällöin saadaan selville magneetin todelliset äärirajat ja havaitaan parhaat säätöparametrit todelliseen käyttöympäristöön. Myös kiihtyvyysanturin sisällyttäminen suljettuun säätöpiiriin on suunnitelmissa. Suuri kuorma kuljettimen päällä lisää värinän vaimentumista, jolloin kuljetin pysähtyy. Kiihtyvyysanturilta saatavaa mittaustietoa käytettäessä säätimen on mah-

dollista vakioida kuljettimen värähtely suurtenkin kuormien alla. Muita mahdollisia jatkotutkimuksen kohteita ovat kuljettimen asentaminen osaksi tehdasautomaatiojärjestelmää. Säätimestä löytyy suuri joukko ominaisuuksia, joilla kuljettimen toimintaa voidaan hallita etänä. Kuljetin voidaan esimerkiksi käynnistää aina kun kuljettimella syötettävän astian pinnankorkeus laskee alle halutun raja-arvon. Tämän kokeileminen vaatii kuitenkin lisäinvestointeja ja rakentamista esimerkiksi pinnankorkeus anturin osalta.

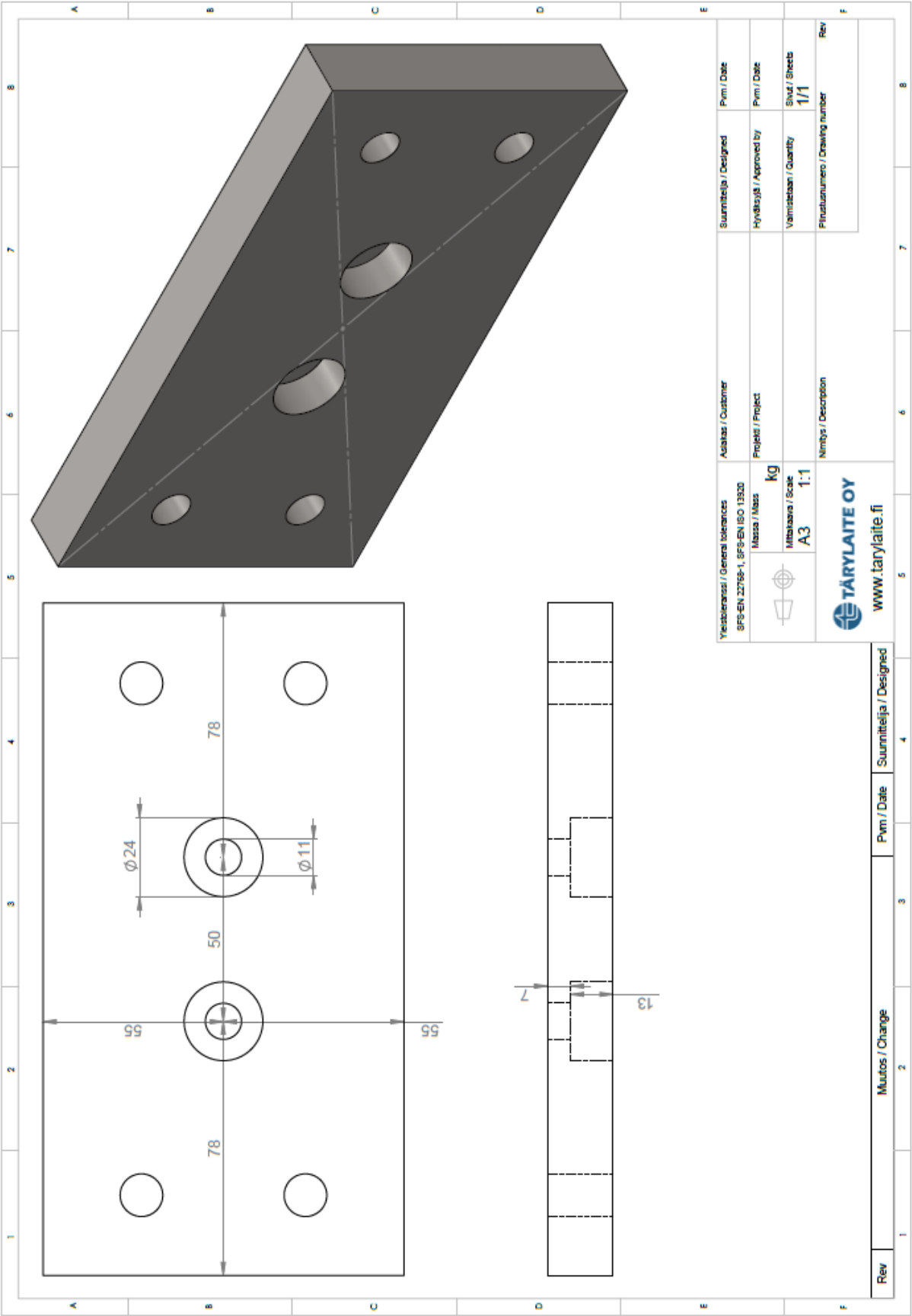
Useiden oivallusten ja erehdysten mukana on herännyt kuitenkin monia kysymyksiä, jotka kaipaavat jatkoselvittelyä ja käytännön kokemusta. Eri aineet vaikuttavat kulkevan kuljettimella paremmin kuin toiset. Kulkeutumiseen vaikuttavia ominaisuuksia on vaikeaa pukea fysikaalisiksi suureiksi tai selittää kaavojen avulla, joten käytäntö näyttäisi olevan toistaiseksi paras tapa oppia lisää. Tässä työssä saavutetut tulokset ovat käytettävyydeltään melko yleispäteviä. Tämän työn kirjallinen tuotos ei yksin riitä rakennusoppaaksi toimivan heittojousikuljettimen rakentamiseen, vaan tähän vaaditaan lisätietoja yksityiskohtien osalta. Tämä työ tarjoaa kuitenkin hyvän mahdollisuuden tutustua tärytekniikan mahdollistamiin kuljetinrakenteisiin.

Kiitos yhteistyökumppaneille, työnantajalle, koululle ja kaikille työn teossa mukana olleille! Oppiminen on läpi elämän kestävä projekti, jossa diplomityö on vain välitutkinto.

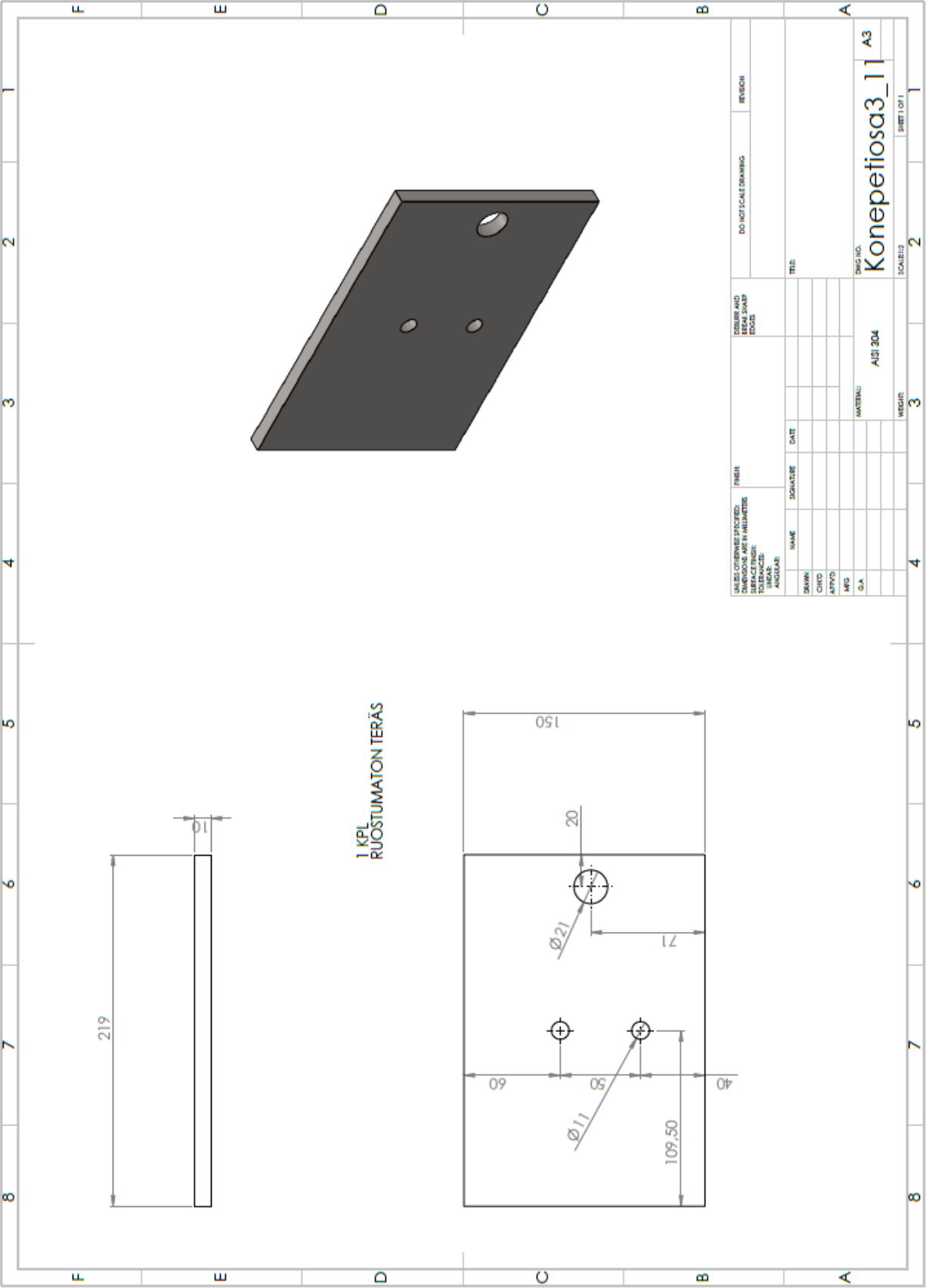
7. LIITTEET



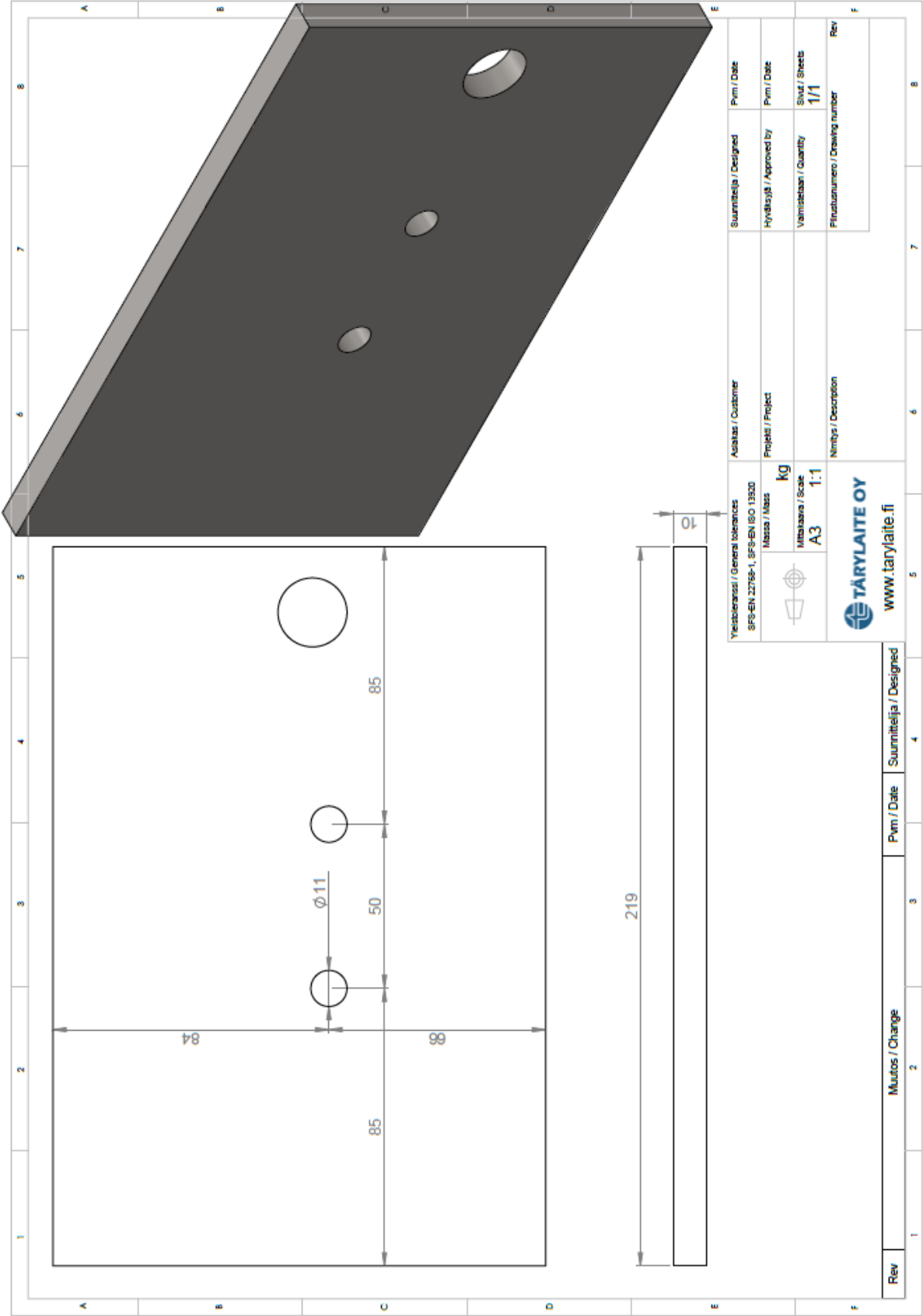
Liite 1



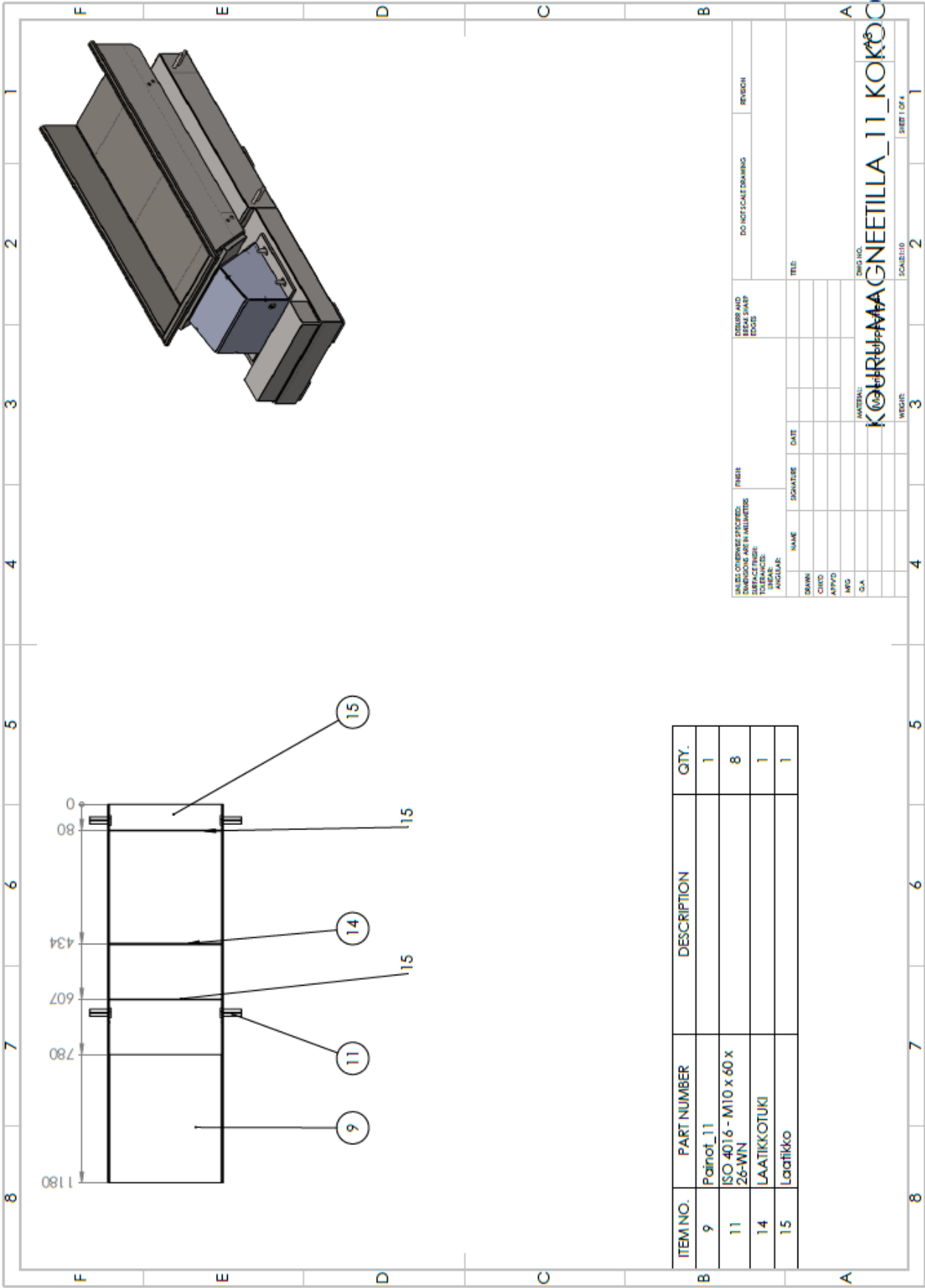
Liite 2



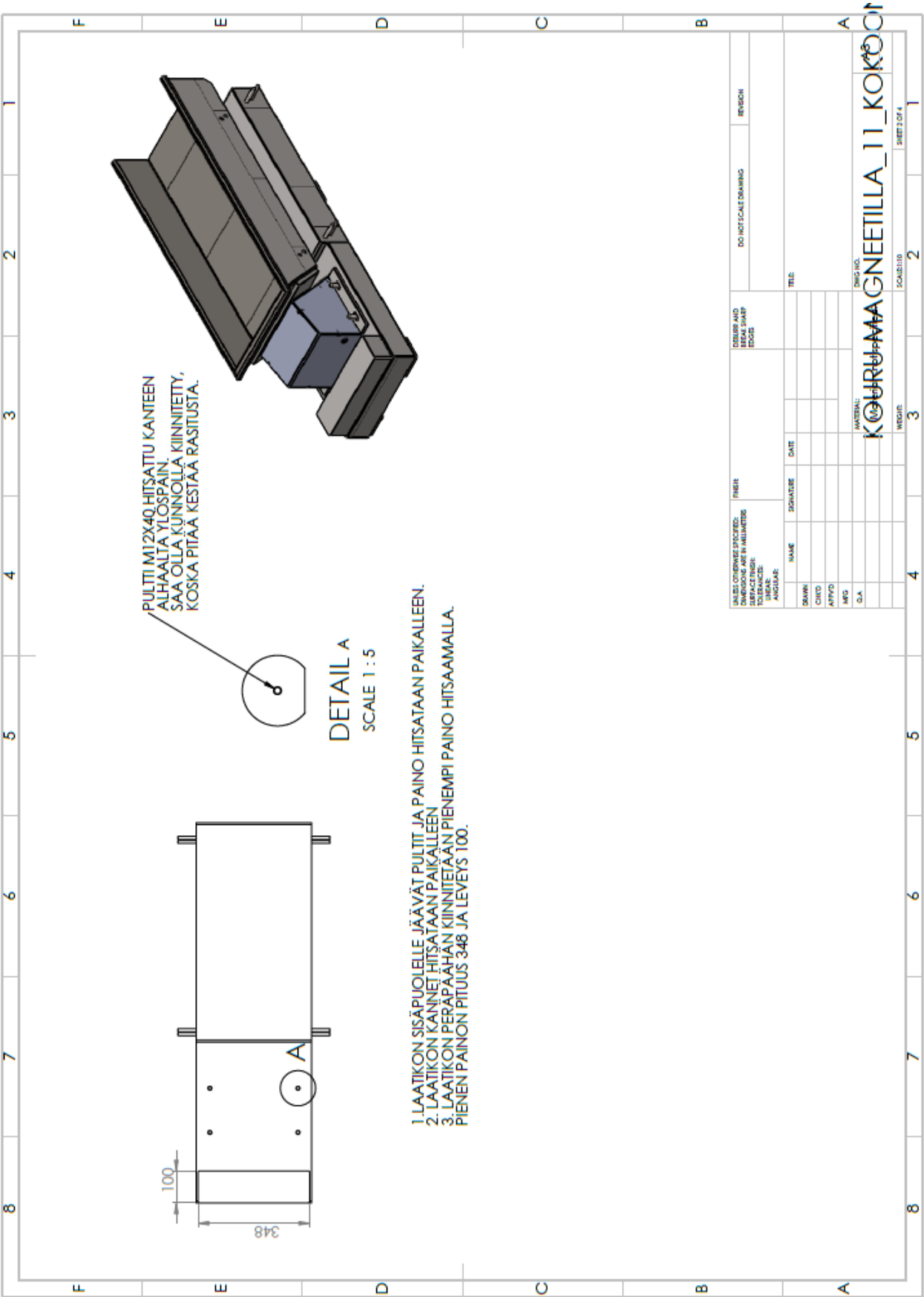
Liite 3



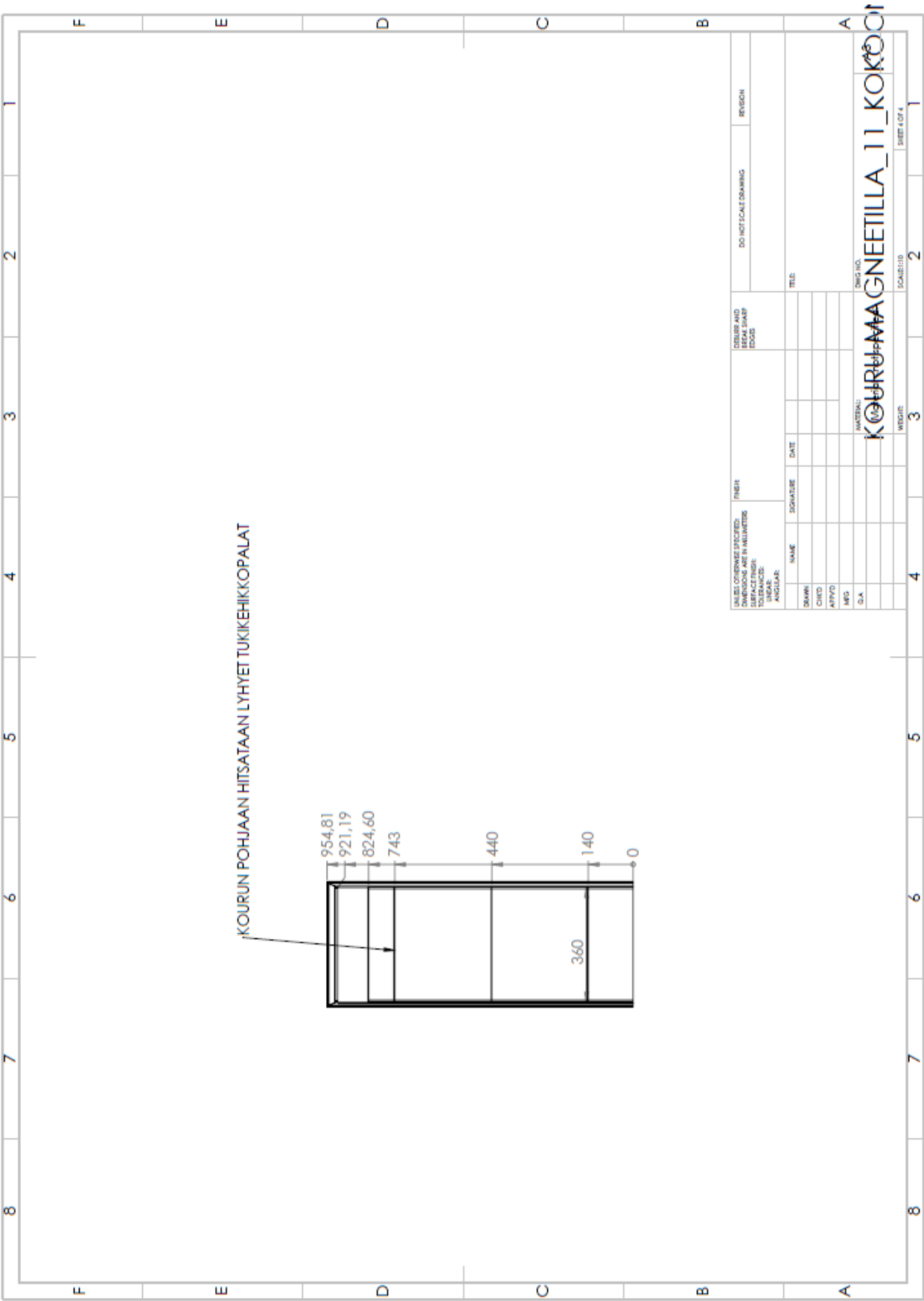
Liite 4



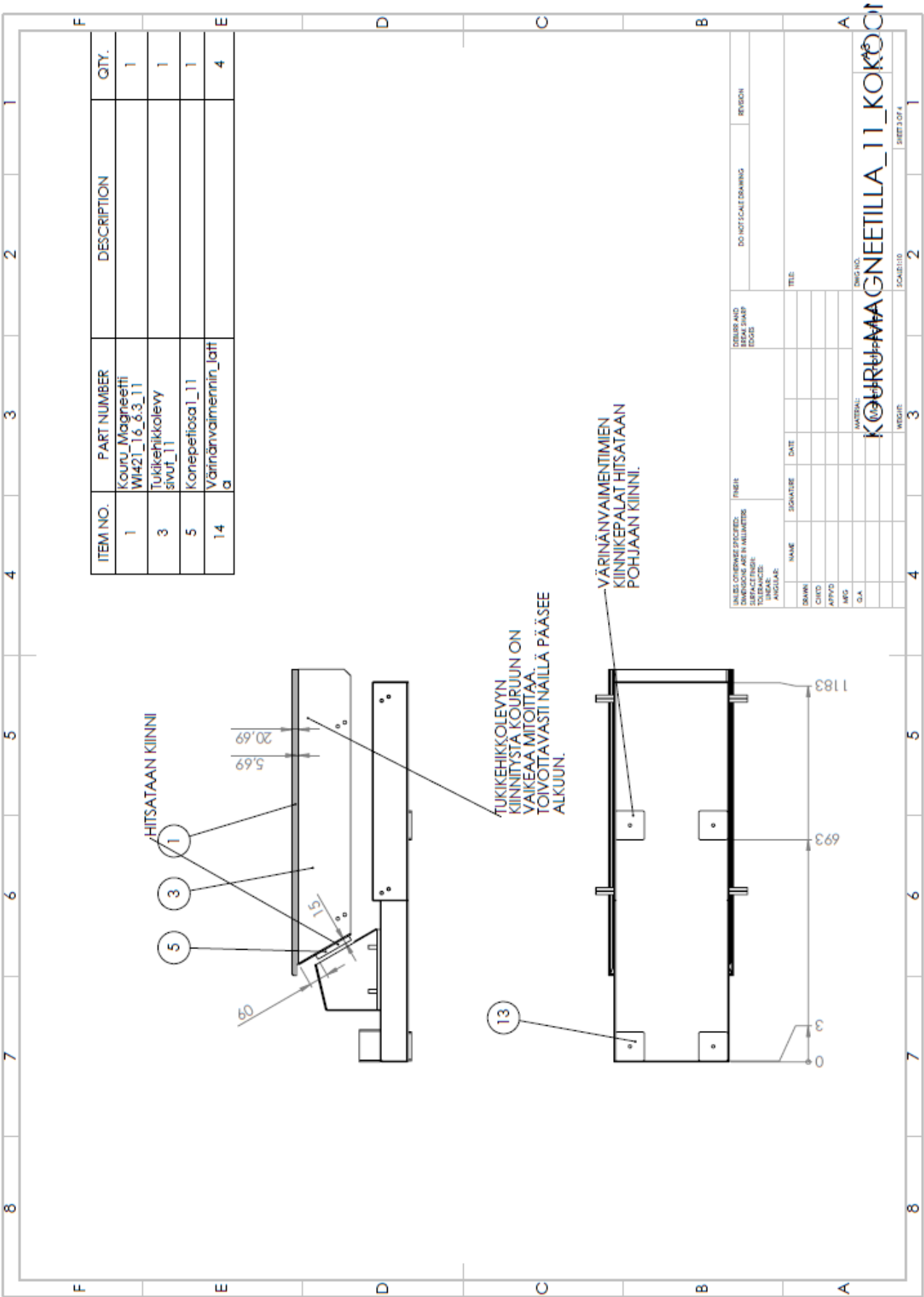
Liite 5



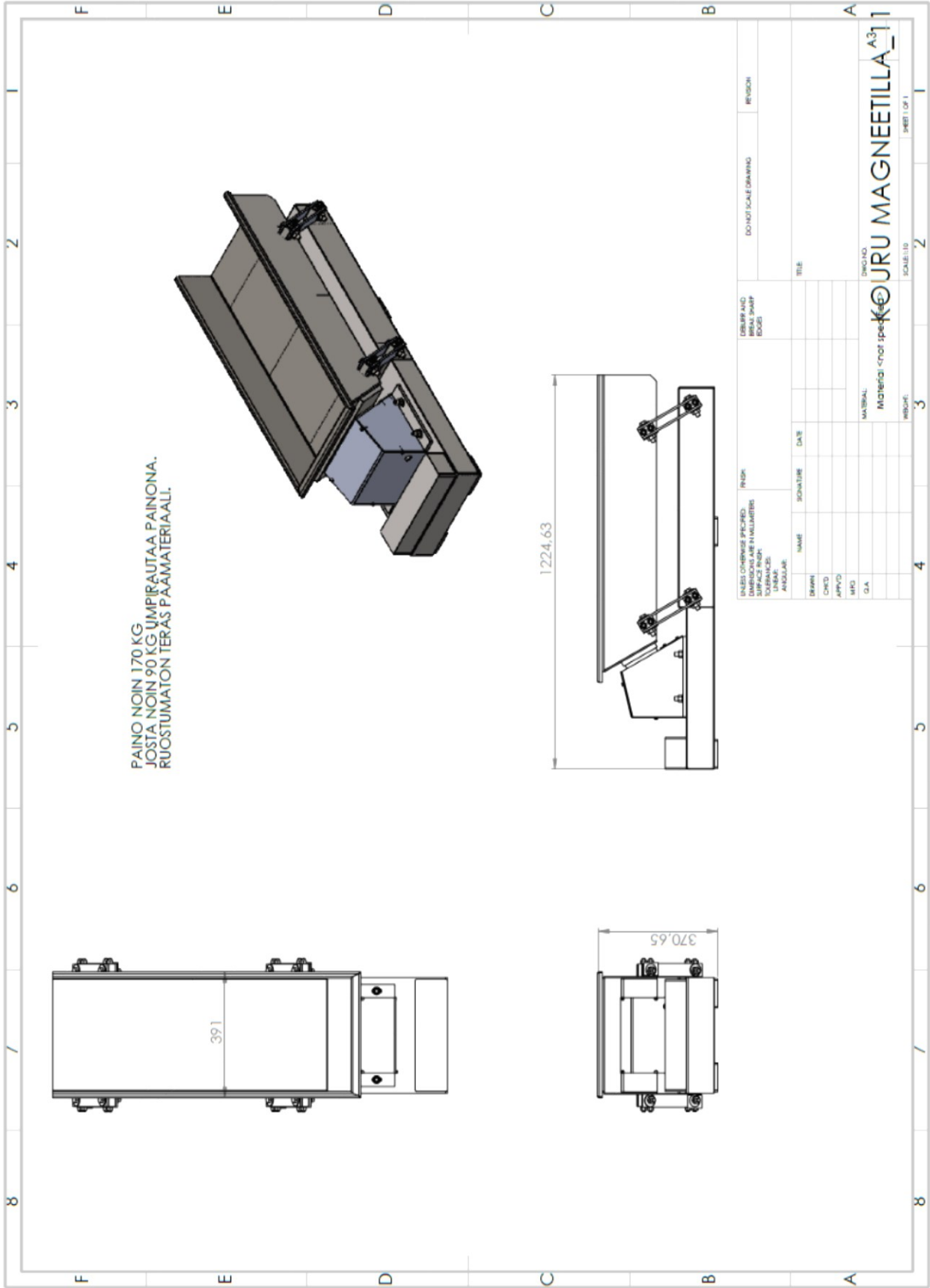
Liite 6



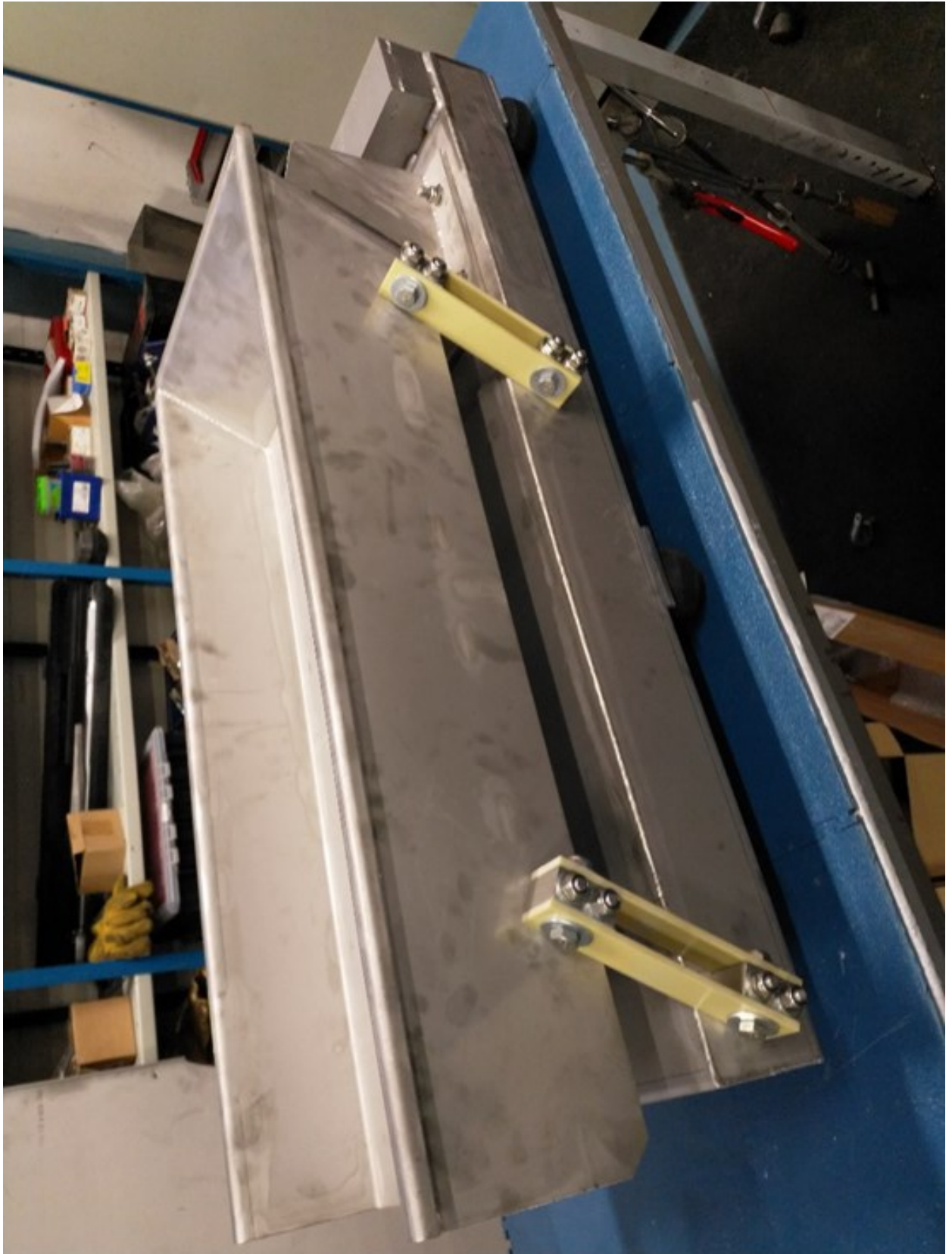
Liite 7



Liite 8



Liite 9



Liite 10

LÄHTEET

- [1] J.R. Brauer, Magnetic Actuators Operated by AC, in: Anonymous (ed.), Magnetic Actuators and Sensors, 2nd ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2013, pp. 129-146.
- [2] D. Rade, E. Albuquerque, L. Figueira & J. Carvalho, Piezoelectric Driving of Vibration Conveyors: An Experimental Assessment, Springer, New York, NY [u.a.], .
- [3] K. Nousiainen, Magneettipiirit ja muuntajat, Tampere, 2016. Saatavissa: Magneettipiirit ja muuntaja kurssin opetusmateriaalina Tampereen Teknillisessä Yliopistossa
- [4] A guide to the use of composite leaf springs in vibrating machinery, 2018. Saatavissa: <http://www.heathcotes.com/downloads/>
- [5] J.N. Keraita, Optimum vibration angle for transporting granular materials on linear conveyors, INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, Vol. 9, Iss. 2, 2008, pp. 3-7.
- [6] ŽV. Despotović, D. Urukalo, M.R. Lečić, A. Čosić, Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results, Applied Mathematical Modelling, Vol. 41, 2017, pp. 1-24.
- [7] Yamato Scale, Multihead Weigher, 4-Mix Product Nuts & Dry Fruits, 2018. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=oACZ4tmPvho>
- [8] Sorting Excellence for Fresh and Frozen Vegetables, 2018. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=_RjSmvyLk0I
- [9] REOVIB
Control units for flexible automation, 2008. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/357934069/REOVIB-Handbook-Feeder-Controller>